

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

2025 ^{Tom}Vol. 35 [№]No. 4

DOI: 10.15507/2658-4123

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504>

ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

Том 35, № 4. 2025

Vol. 35, no. 4. 2025

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-Chief 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», 2025

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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



Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Russian Index of Science Citation

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

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

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

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

Alexey P. 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 Nizhny Novgorod State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119> (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Куанг Х. Д., Гайдар С. М., Пикина А. М., Лапсарь О. М., Нгуен Т. Т. С.
Технология защиты черных и цветных металлов с использованием азотсодержащих органических соединений 606
- Зверовщиков А. Е., Стешкин А. В., Гурин П. А., Миронычев Н. А., Зотов Е. В.,
Скрябин В. А. Влияние технологических факторов центробежно-планетарной обработки на шероховатость внутренних каналов мелкогабаритных деталей 623

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Савин В. Ю., Ожерельев В. Н., Никитин В. В., Адылин И. П.
Экспериментальное исследование процесса предварительного выделения легких компонентов очесанного вороха 641
- Киприянов Ф. А., Савиных П. А. Оценка возможности плющения микронизированного фуражного зерна 658
- Ракутько С. А., Ракутько Е. Н., Су Ц. Оценка содержания хлорофилла по оптической плотности листьев растений с использованием машинного обучения 678
- Белов М. И., Андреев С. А., Шабасев Е. А., Кабдин Н. Е., Белов Д. В.
Компьютерное моделирование автоматического управления сельскохозяйственным малым беспилотным летательным аппаратом с переменной массой 700
- Джаббаров Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П. Оценка экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве 723
- Припоров И. Е., Курасов В. С., Бацунов В. И. Разрушение стерни подсолнечника лопатками игольчатого диска инновационного турбодискового культиватора 750
- Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмашкин Е. А. Техно-экономическое обоснование применения аддитивных технологий при восстановлении сельскохозяйственной техники 770

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

- Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А. Численное исследование влияния направления вдува капель на поглощение частиц пыли 786

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

- Виноградова А. В., Виноградов А. В., Букреева А. К. Удельные показатели последствий отключений в электрических сетях 110 кВ 808
- Информация для авторов и читателей* 825

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

Quang H. D., Gaidar S. M., Pikina A. M., Lapsar O. M., Nguyen T. T. X. Investigation of the Protective Effectiveness of Nitrogen-Containing Organic Compounds in Protecting Ferrous and Non-Ferrous Metals	606
Zverovshchikov A. E., Steshkin A. V., Gurin P. A., Mironychev N. A., Zotov E. V., Skryabin V. A. The Influence of Technological Factors of Centrifugal Planetary Treating the Roughness of the Internal Channels of Small-Sized Parts	623

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

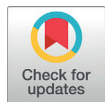
Savin V. Yu., Ozherelev V. N., Nikitin V. V., Adylin I. P. Experimental Study of the Process of Preliminary Separation of Light Impurities from Combed Heap	641
Kipriyanov F. A., Savinykh P. A. Assessment of Possibility for Flattening Micronized Feed Grain	658
Rakutko S. A., Rakutko Ye. N., Su J. Estimating Chlorophyll Content by Optical Density of Plant Leaves Using Machine Learning	678
Belov M. I., Andreev S. A., Shabaev E. A., Kabdin N. E., Belov D. V. Computer Simulation of Automatic Control of an Agricultural Small Unmanned Aerial Vehicle with Variable Mass	700
Jabborov N. I., Dobrinov A. V., Savelyev A. P. Assessment of Environmental Sustainability and Stability of Crop Production Technological Processes	723
Priporov I. E., Kurasov V. S., Bacunov V. I. Breaking Sunflower Stubble by Needle Disk Blades of an Innovative Turbodisc Cultivator	750
Senin P. V., Chatkin M. N., Kilmyashkin E. A. Feasibility Study of Additive Technologies Application in Restoring Agricultural Machinery	770

INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

Tukmakov A. L., Tukmakov D. A. Numerical Study of the Influence of Droplet Injection Direction on Dust Particle Absorption	786
--	-----

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Vinogradova A. V., Vinogradov A. V., Bukreeva A. K. Specific Indicators of the Consequences of Outages in 110 kV Electrical Networks	808
<i>Information for Authors and Readers of the Journal</i>	825

**МАШИНОСТРОЕНИЕ /
MECHANICAL ENGINEERING**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.606-622>EDN: <https://elibrary.ru/akdfth>

УДК / UDK 620.197.3

Оригинальная статья / Original article

**Технология защиты черных и цветных металлов
с использованием азотсодержащих органических
соединений****Х. Д. Куанг^{1,3}, С. М. Гайдар^{1,2}, А. М. Пикина^{1,2}✉,
О. М. Лапсарь^{1,2}, Т. Т. С. Нгуен³**¹ *Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К. А. Тимирязева,**г. Москва, Российская Федерация*² *Российский государственный университет
им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),**г. Москва, Российская Федерация*³ *Российско-Вьетнамский Тропический научно-
исследовательский и технологический центр,**г. Хошимин, Вьетнам*✉ pikina@rgau-msha.ru**Аннотация**

Введение. Одним из перспективных классов ингибиторов коррозии являются летучие или парофазные, которые, испаряясь при температуре окружающей среды, адсорбируются на поверхности металлов и обеспечивают надежную антикоррозионную защиту. Летучие ингибиторы коррозии проникают в щели и зазоры, недоступные контактными ингибиторами, обеспечивают торможение коррозионных процессов по слоям продуктов коррозии. Их применение оправдано при герметизации защищаемого пространства, предотвращающей улетучивание ингибиторов. В настоящее время не существует слаболетучих ингибиторов коррозии, устойчивых к температуре выше 80 °С, поэтому используются различные упаковочные материалы, обладающие малой влаго- и газопроницаемостью. В процессе применения таких материалов при консервации металлических изделий выявлены недостатки: гигроскопичность бумаги, процесс деструкции летучих ингибиторов коррозии при температуре экструзии полимеров, большая доля ручного труда при консервации.

Цель исследования. Разработать эффективную технологию защиты черных и цветных металлов с использованием азотсодержащих органических соединений – летучих ингибиторов коррозии.

Материалы и методы. По результатам проведенных электрохимических и ускоренных испытаний рассчитаны скорость коррозии, степень защиты и коэффициент торможения. В качестве образцов, на которых было испытано антикоррозионное

© Куанг Х. Д., Гайдар С. М., Пикина А. М., Лапсарь О. М., Нгуен Т. Т. С., 2025

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

действие летучих ингибиторов коррозии, выбраны пластины из стали марки Ст3. Для определения защитной эффективности полученных ингибиторов проведены лабораторные испытания. Реагенты были представлены этаноламином, борной кислотой, моно(аминоэтил)боратом, ди(аминоэтил)боратом и три(аминоэтил)боратом; соотношение реагентов и температура реакции варьировались в процессе исследований.

Результаты исследования. По результатам работы получена серия летучих ингибиторов коррозии. Определено, что при электрохимическом исследовании в 0,1 моль/л растворе хлорида натрия наилучшие результаты зафиксированы в составе на основе этаноламина и борной кислоты в соотношении три к одному, а именно три(аминоэтил)бората. Оптимальная концентрация ингибитора на стальных поверхностях при ускоренных испытаниях в среде с относительной влажностью воздуха 100 % составляет 200 г/м³.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты имеют потенциал для прикладного применения по защите от атмосферной коррозии черных и цветных металлов. Перспективной сферой их использования является защита с помощью летучих ингибиторов стального оборудования и систем электрозащиты, содержащих цветные (медь, латунь) металлы, в сельскохозяйственном производстве, машиностроении и других областях.

Ключевые слова: ингибитор коррозии, реакция конденсации, аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат, три(аминоэтил)борат, этаноламин, борная кислота

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Куанг Х.Д., Гайдар С.М., Пикина А.М., Лапсарь О.М., Нгуен Т.Т.С. Технология защиты черных и цветных металлов с использованием азотсодержащих органических соединений. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):606–622. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.606-622>

Investigation of the Protective Effectiveness of Nitrogen-Containing Organic Compounds in Protecting Ferrous and Non-Ferrous Metals

H. D. Quang^{a,c}, S. M. Gaidar^{a,b}, A. M. Pikina^{a,b}✉,
O. M. Lapsar^{a,b}, T. T. X. Nguyen^c

^a Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation

^b The Kosygin State University of Russia,
Moscow, Russian Federation

^c Joint Russian-Vietnamese Tropical Research
and Technology Center,
Ho Chi Minh, Vietnam

✉ pikina@rgau-msha.ru

Abstract

Introduction. A promising class of corrosion inhibitors is volatile or vapor-phase ones. They evaporate at ambient temperatures adsorbing on metal surfaces and providing reliable corrosion protection. Volatile corrosion inhibitors penetrate crevices and gaps inaccessible to contact inhibitors, inhibiting corrosion processes along layers of corrosion products. Their use is justified by sealing the protected space, preventing inhibitor evaporation. Currently, there are no low-volatile corrosion inhibitors resistant to temperatures

above 80°C, so various packaging materials with low moisture and gas permeability are used. The use of such materials for preserving metal products has revealed several disadvantages: the hygroscopic nature of paper, the degradation of volatile corrosion inhibitors at polymer extrusion temperatures, and the high degree of manual labor required during preservation.

Aim of the Study. The study is aimed at developing an effective technology for protecting ferrous and non-ferrous metals using nitrogen-containing organic compounds – volatile corrosion inhibitors.

Materials and Methods. Based on the results of electrochemical and accelerated tests, the corrosion rate, protection level, and inhibition coefficient were calculated. St3 steel plates were selected as the samples on which the anticorrosive effect of volatile corrosion inhibitors was tested. Laboratory tests were conducted to determine the protective effectiveness of the resulting inhibitors. The reagents included ethanalamine, boric acid, mono(aminoethyl)borate, di(aminoethyl)borate, and tri(aminoethyl)borate. The reagent ratio and reaction temperature were varied during the study.

Results. A series of volatile corrosion inhibitors were obtained in this study. It was determined that, in electrochemical testing in a 0.1 mol/l sodium chloride solution, the best results were obtained with a composition based on ethanalamine and boric acid in a three-to-one ratio, namely, tri(aminoethyl)borate. The optimal inhibitor concentration on steel surfaces during accelerated testing in an environment with 100% relative humidity is 200 g/m³.

Discussion and Conclusion. The results obtained have potential for practical application in atmospheric corrosion protection of ferrous and non-ferrous metals. A promising area of application is the protection of steel equipment and electrical protection systems containing non-ferrous metals (copper, brass) using volatile inhibitors in agricultural production, mechanical engineering, and other fields.

Keywords: corrosion inhibitor, condensation reaction, aminoethyl borate, di(aminoethyl) borate, tri(aminoethyl)borate, ethanalamine, boric acid

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

For citation: Quang H.D., Gaidar S.M., Pikina A.M., Lapsar O.M., Nguyen T.T.X. Investigation of the Protective Effectiveness of Nitrogen-Containing Organic Compounds in Protecting Ferrous and Non-Ferrous Metals. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):606–622. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.606-622>

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из металлов под действием различных природных, физико-химических и биологических факторов корродируют и теряют свои потребительские качества. Выбор оптимального способа защиты металлов, зависящего от области применения изделия, позволяет значительно снизить материальный ущерб, вызванный коррозией [1; 2]. В настоящее время одним из распространенных методов защиты металлов от коррозии является использование ингибиторов [3–5]. Основное его преимущество – возможность значительного снижения коррозионного разрушения при наименьших затратах. Многочисленные исследования в области защиты металлов от коррозии связаны с поиском новых и изучением уже существующих ингибирующих составов.

Среди наиболее перспективных классов ингибиторов коррозии выделяются летучие ингибиторы коррозии (ЛИК) [6; 7], применение которых возможно при наличии изолированного защищаемого пространства. При переходе ЛИК в газообразное состояние его молекулы проникают в зазоры, недоступные другим видам ингибиторов, адсорбируются на поверхности металла и образуют защитную пленку, обеспечивающую замедление коррозионных процессов и, как следствие, защиту металлоизделия.

В качестве летучих ингибиторов коррозии металлов используются органические соединения различных классов: азотсодержащие (амины, азолы, нитросоединения), кислородсодержащие (спирты, сложные эфиры органических и неорганических кислот) и другие соединения [8].

Высокую антикоррозионную активность по отношению к черным и цветным металлам показали аминоспирты. Антикоррозионное действие таких производных спиртов можно объяснить образованием комплексных соединений между гетероатомами (азотом или кислородом) и ионом металла. Использование борных эфиров аминоспиртов позволяет также получать прочные хелатные комплексы. Это приводит к образованию на поверхности металла труднорастворимых защитных пленок, которые формируются за счет донорно-акцепторной связи между атомами азота и кислорода, с одной стороны, и атомом металла – с другой [9].

Взаимодействие этаноламинов с борной кислотой может приводить к большому количеству различных продуктов в зависимости от условий проведения реакции. В настоящем исследовании синтезирована серия веществ в результате взаимодействия этаноламина и борной кислоты, а также изучены антикоррозионные свойства новых ингибиторов коррозии на образцах из стали Ст3.

Цель исследования – разработать технологию синтеза летучих ингибиторов коррозии с использованием азотсодержащих органических соединений и провести оценку их защитной эффективности по отношению к черным и цветным металлам.

Задачи исследования:

- 1) разработать рецептуру летучего ингибитора коррозии;
- 2) оптимизировать концентрацию ингибитора в защищаемой среде;
- 3) определить защитную эффективность полученных ингибиторов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Один из наиболее перспективных классов ингибиторов коррозии – летучие ингибиторы [10; 11]. Их применение оправдано в случае наличия возможности частичной изоляции защищаемого пространства. Испаряясь при температуре окружающей среды, такие ингибиторы в виде паров достигают металла, адсорбируются на его поверхности и, насыщая конденсированные фазы, обеспечивают надежную защиту изделия. Пары летучего ингибитора коррозии проникают в щели и зазоры, недоступные контактными ингибиторами, обеспечивают торможение коррозионных процессов под слоями продуктов коррозии и отложений [12–14].

Началом проведения ежегодных симпозиумов по теме коррозионных разрушений и защите изделий от коррозии является 1960 г. [15]. В результате учеными были разработаны многие виды летучих ингибиторов, которые не имели недостатков предыдущих материалов и были способны замедлять анодные и катодные процессы коррозии [16; 17].

К настоящему времени уже выпущен огромный ряд безвредных для человека ингибиторов: VIBATAN Metal Antiox01792 – защищает от коррозии как черные, так и цветные металлы, используется для защиты металлических изделий, электронных и электротехнических их частей [18].

Наиболее распространенными летучими ингибиторами отечественного производства являются производные и соли алифатических, ароматических, циклических и гетероциклических аминов [19]: НДА, Г-2, КЦА, ИФХАН-100 и ВНХЛ-49, а также добавился целый ряд новых образцов: ВНХ-Л-20, Н-М1, ФМТ, ИФХАН-34, ИФХАН-67, ИФХАН-118, НДА, ХЦА, КЦА, СП-В, КПП-ПК.

Ингибитор атмосферной коррозии Н-М-1 применяют для защиты металлов от атмосферной и биологической коррозии в процессе всей эксплуатации изделия в различных климатических условиях. К подобным ингибиторам также относится состав ВНХ-Л-20 [19]. Основное назначение средства – защита сложных металлических поверхностей и неметаллических материалов от биоповреждений. Его применяют внутри изолированного пространства для консервации, хранения и при транспортировке грузов на дальние расстояния.

ИФХАН-118 – универсальный ингибитор коррозии 4-го поколения, его применение на практике регламентируется ГОСТ 9.014-78 «ЕСЗКС. Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования» [20]. Эффективен при защите широкого спектра черных и цветных металлов (с покрытиями и без) в агрессивных атмосферах, а также для защиты железа, алюминия, меди, цинка, олова и их сплавов. Технология использования ингибитора зависит от конкретной задачи.

Анализ существующих аналогичных защитных материалов показал, что технической проблемой в данной сфере является необходимость расширения ассортимента антикоррозионных составов для защиты металлических поверхностей. Проведенные исследования по разработке состава и оценке его эффективности актуальны ввиду повышенных требований к коррозионной стойкости изделий из черных металлов в условиях высокой влажности и температуры, а также воздействия соляного тумана [20].

Полученное соединение при малой летучести образует достаточное давление насыщенного пара для эффективной защиты.

Разработанный состав ЛИК позволяет его применять в виде растворов, аэрозолей, а также на специальных носителях – силикагеле, оксиде алюминия, поропластах и др.

Несмотря на многочисленные публикации по изучаемой проблематике, до сих пор отсутствуют исследования по механизму защитного действия ингибиторов, не установлены зависимости защитного эффекта от количества функциональных групп. В данном исследовании проведен анализ получаемых продуктов конденсации этаноламинов и борной кислоты, представлена структурная формула полученного вещества, а также установлена зависимость защитной эффективности летучего ингибитора от количества функциональных групп. Потенциометрические исследования позволили описать механизм защитного действия ингибитора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Химические материалы

В качестве химических материалов использованы сталь марки Ст3 по ГОСТ 380-2005¹, борная кислота, этаноламин, NaCl.

¹ ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/5550/> (дата обращения: 21.02.2025).

Методы исследования

Синтез летучих ингибиторов коррозии

Синтез аминоэтилбората (V1). В колбе, снабженной термометром и прямым холодильником, 30,5 г (0,5 моль) этаноламина нагревали при перемешивании до 70 °С, после чего добавляли 31,0 г (0,5 моль) борной кислоты. Получившаяся смесь нагревалась до 130 °С, в ходе чего происходила реакция конденсации с выделением воды. Температуру реакционной смеси увеличили до 160 °С, вследствие чего была получена прозрачная однородная масса. Полученный продукт (V1) после охлаждения до комнатной температуры принял вид стекляннной твердости.

Синтез ди(аминоэтил)бората (V2). В колбе, снабженной термометром и прямым холодильником, 61,0 г (1,0 моль) этаноламина нагревали при перемешивании до 70 °С, затем добавляли 31,0 г (0,5 моль) борной кислоты. Смесь нагревали до 130 °С, в ходе чего происходила реакция конденсации с выделением воды. Температуру реакционной смеси увеличили до 160 °С, вследствие чего была получена прозрачная однородная масса. Полученный продукт (V2) после охлаждения до комнатной температуры принял вид прозрачной однородной жидкости (78,2 г) с аминовым числом 395,9 мгHCl/г.

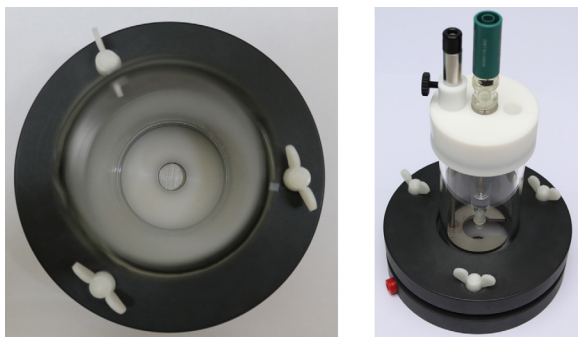
Синтез три(аминоэтил)бората (V3). В колбе, снабженной термометром и прямым холодильником, 91,5 г (1,5 моль) этаноламина нагревали при перемешивании до 70 °С, затем добавляли 31,0 г (0,5 моль) борной кислоты. Смесь нагревали до 130 °С, в ходе чего происходила реакция конденсации с выделением воды. Температуру реакционной смеси поднимали до 160 °С, вследствие чего была получена прозрачная однородная масса. Полученный продукт (V3) после охлаждения до комнатной температуры принял вид прозрачной однородной жидкости (105,2 г) с аминовым числом 499,9 мгHCl/г.

Электрохимические исследования

Образцы рабочих электродов из стали Ст3 механически и химически (раствор C_2H_5OH в 3 %-м HNO_3) полировались с последующим обезжириванием в смеси ацетона и этилового спирта. Площадь рабочего электрода составляла 0,785 см².

Электрохимические исследования выполнялись на потенциостате PGSTAT302N с трехэлектродной системой: рабочий электрод был изготовлен из исследуемого материала (сталь Ст3); в качестве электрода сравнения применяли хлорсеребряный электрод, помещенный в капилляр Габера – Луггина (рис. 1); противозлектродиз из нержавеющей стали. В качестве фонового раствора использовался 0,1 моль/л раствор NaCl. Диапазон сканирующего потенциала, рассчитанный по хлорсеребряному электроду сравнения, составляет от –0,5 до +0,5 В; скорость сканирования – 0,25 В/с; время погружения образца перед измерением – 300 с, что регламентируется ГОСТ 9.509-89². Температура во всех измерениях была постоянной $t = 25$ °С. Параметры коррозии стали Ст3 рассчитывались методом тафелевской экстраполяции с использованием программного обеспечения NOVA 2.1.

² ГОСТ 9.509-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Методы определения защитной способности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200014793> (дата обращения: 21.02.2025).



Р и с. 1. Рабочий электрод (сталь Ст3) и держатель рабочего электрода
F i g. 1. Working electrode (St3 steel) and working electrode holder

Источник: рисунки составлены авторами статьи в программе AdobePhotoshop.
Source: the figures were created by the authors of the article using Adobe Photoshop.

Степень защиты (Z , %) определяли по формуле [21]:

$$Z = \left(1 - \frac{K}{K_0} \right) \cdot 100,$$

где K_0 – скорость коррозии стали Ст3 в фоновом растворе в отсутствии ингибитора, мм/г; K – скорость коррозии стали Ст3 в фоновом растворе в присутствии ингибитора, мм/г.

Коэффициент торможения γ рассчитывали по формуле:

$$\gamma = \frac{K_0}{K}.$$

Антикоррозионное ускоренное испытание

Испытательные пластинки из стали Ст3 с площадью поверхности $(50,0 \times 50,0) \pm 0,2$ мм, толщиной 3,0–3,5 мм зачищали наждачной бумагой, промывали в спирте, ацетоне и высушивали. Образцы подвешивали вертикально на штативах из нержавеющей стали так, чтобы расстояние между ними составляло не менее 10 мм и не менее 100 мм от дна банки, а испытательный штатив помещали в банку-эксикатор с плотной крышкой.

Образцы летучих ингибиторов коррозии помещали в колбу, концентрация ингибитора составляла 100...300 г/м³. Испытания проводили в течение трех дней при температуре 25 °С для обеспечения адсорбции ингибитора на поверхности исследуемых образцов. Контрольный образец был также обработан ЛИК, но в колбу не помещался.

Относительная влажность в колбе составила 100 % (относительную влажность поддерживали добавлением на дно колбы дистиллированной воды в объеме 1/100 колбы). Исследования проводили в 20 циклов, длительность одного цикла составляла 24 ч. При начале каждого цикла в первые 7 ч камеру нагревали до 40 ± 2 °С. Далее камера остывала до комнатной температуры (25 ± 2 °С). Образцы выдерживались при данной температуре в течение последующих 17 ч для конденсации влаги на исследуемых образцах.

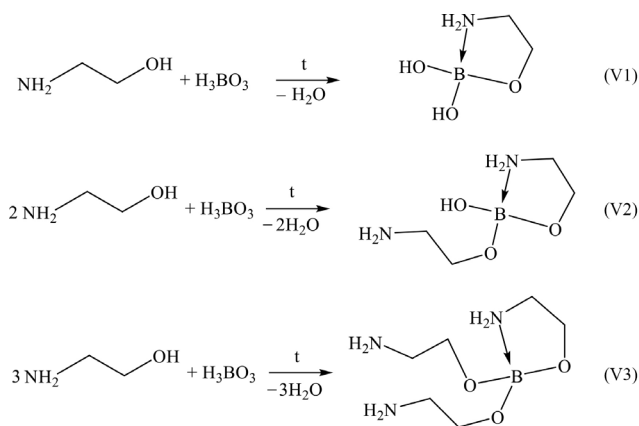
После окончания периода испытаний (20 циклов) образец вынимали из испытательного сосуда, промывали этанолом, ацетоном и сушили.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты синтеза ингибиторов

Взаимодействие этаноламина с борной кислотой может приводить к образованию различных продуктов, что зависит от соотношения исходных реагентов и условий проведения реакции (рис. 2).

При нагревании происходит конденсация борной кислоты и этаноламина с выделением воды. Строение образующихся эфиров борной кислоты зависит от соотношения исходных реагентов. При проведении реакции в мольном соотношении 1:1, 2:1 и 3:1 образуются аминоэтилборат, ди(аминоэтил)борат и три(аминоэтил)борат соответственно (рис. 2); в мольном соотношении 1:1 – аминоэтилборат (V1) в виде стеклянной твердости, не обладающей летучестью, поэтому рассматривать их в качестве летучих ингибиторов коррозии было нецелесообразно.



Р и с. 2. Взаимодействие этаноламина с борной кислотой в различных мольных соотношениях

F i g. 2. Interaction of ethanolamine with boric acid in various molar ratios

Источник: рисунок составлен авторами статьи.

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

По результатам проведенных электрохимических и ускоренных испытаний были рассчитаны скорость коррозии, степень защиты и коэффициент торможения.

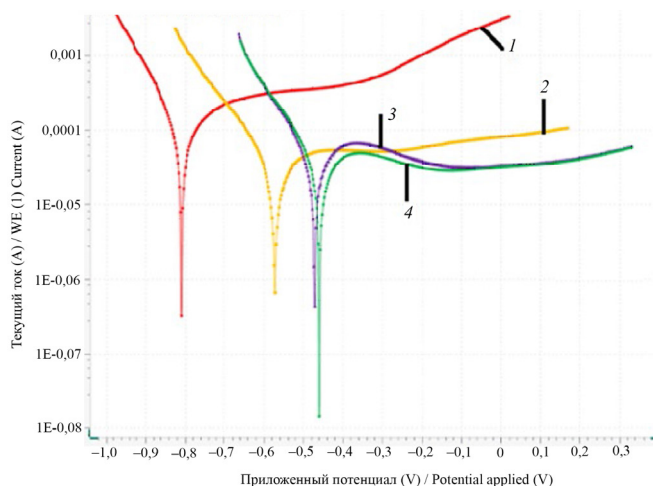
Результаты электрохимических исследований

Сравнение защитной способности различных ингибиторов

Для сравнения защитной способности ингибиторов электрохимическим методом были взяты образцы ингибиторов V1, V2, V3 в одной концентрации 2,0 % в фоновом 0,1 моль/л растворе NaCl. Результаты исследования представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

Потенциометрическое исследование показало, что присутствие в 0,1 моль/л растворе NaCl ингибитора ускоряют катодную и сильно замедляют анодную реакции, при этом потенциал коррозии смещается в положительную сторону.

Таким образом, ингибиторы V1, V2, V3 по характеру защитного действия являются соответственно анодными. Наблюдаемый синергетический эффект ингибиторов можно объяснить их воздействием на анодные участки. Анодные ингибиторы – доноры электронов по отношению к металлу, уменьшают энергию выхода электрона из металла. Данный ингибитор образует хемосорбционные соединения прежде всего на положительно заряженных электроноакцепторных участках, т. е. на анодных участках корродирующего металла.



Р и с. 3. Поляризационные кривые на стали Ст3 при различных ингибиторах:

1 – фоновый раствор; 2 – V1; 3 – V2; 4 – V3

F i g. 3. Polarization curves on St3 steel with using different inhibitors:

1 – background solution; 2 – V1; 3 – V2; 4 – V3

Источник: рисунки 3, 4 составлены авторами статьи в программе Nova 2.1.

Source: the figures 3, 4 were created by the authors of the article using the Nova 2.1 program.

Примечание: ингибиторы V1, V2 и V3 в одинаковой концентрации 2 %.

Note: V1, V2 and V3 inhibitors at the concentration of 2%.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Параметры коррозии стали Ст3 в 0,1 моль/л растворе NaCl
в зависимости от различных ингибиторов

Corrosion parameters of St3 steel in a 0.1 mol/l NaCl
solution depending on various inhibitors

№	Ингибитор / Inhibitor	$ b_a $, V/ dec	$ b_c $, V/dec	$-E_{corr}$, mB / mB	i_{corr} , $\mu A/cm^2$ / A/cm^2	K, мм/г / mm/g	Z, %	γ
1	*	0,280	0,101	808	93,508	0,6168	–	–
2	V1	0,477	0,141	571	31,198	0,2058	66,640	3,000
3	V2	0,197	0,096	473	26,925	0,1776	71,210	3,470
4	V3	0,220	0,096	458	22,821	0,1505	75,590	4,100

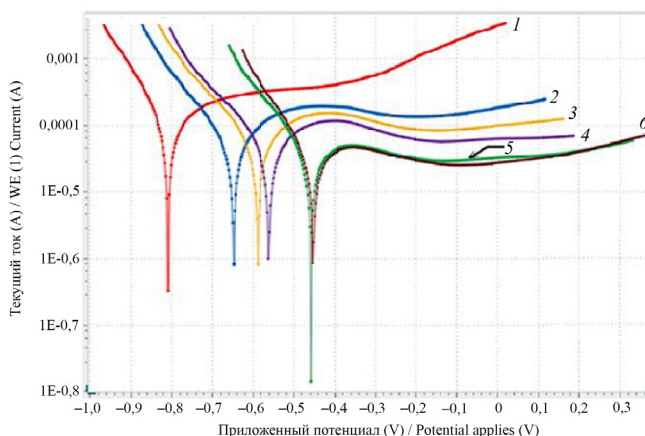
Примечание: * – контрольный опыт в фоновом растворе; V2 – ингибитор 2; V3 – ингибитор 3.

Note: * – control experiment in the background solution; V2 – inhibitor 2; V3 – inhibitor 3.

Наблюдается увеличение ингибирования коррозии в следующем порядке: моноэтаноламин < ди(аминоэтил)борат < три(аминоэтил)борат. Ингибитор V3 обеспечивает наилучшее торможение процесса коррозии происходит при использовании, что согласуется с ускоренными испытаниями. Как видно из поляризационных кривых, такой ингибитор перемещает потенциал в положительную сторону ($\Delta E_{\text{согг}} = 350\text{мВ}$), по сравнению с $E_{\text{согг}}$ в фоновом растворе.

Исследования защитной способности ингибитора V3 при различных концентрациях

Для исследования были взяты ингибитор V3 в диапазоне концентрации 0,5 ÷ 3,0 % в 0,1 моль/л фоновом растворе NaCl. Результаты исследования представлены на рисунке 4, 5 и в таблице 2.



Р и с. 4. Электрохимические исследования стали Ст3 при различных концентрациях ингибитора V3:

1 – фоновый раствор; 2 – 0,5 %; 3 – 1,0 %; 4 – 1,5 %; 5 – 2,0 %; 6 – 3,0 %

F i g. 4. Electrochemical studies of St3 steel at various concentrations of V3 inhibitor:

1 – background solution; 2 – 0.5%; 3 – 1.0%; 4 – 1.5%; 5 – 2.0%; 6 – 3.0%

Т а б л и ц а 2

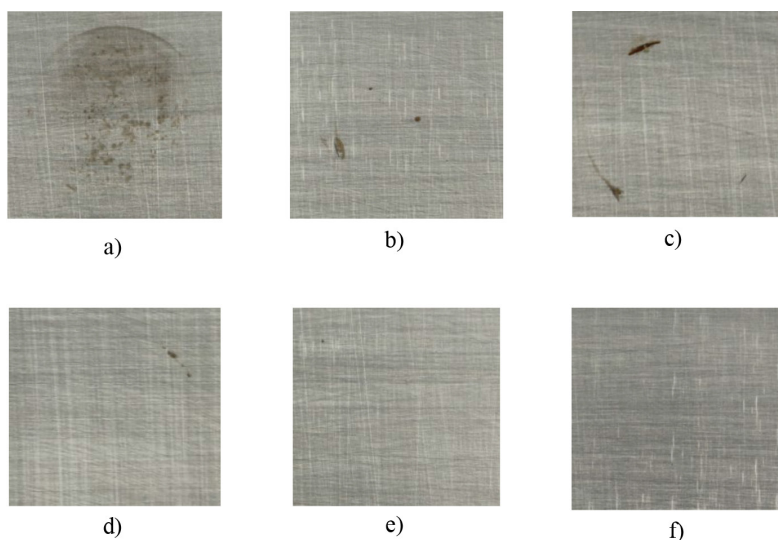
Table 2

Параметры коррозии стали Ст3 в 0,1 моль/л растворе NaCl в зависимости от различных концентраций ингибитора V3

St3 steel corrosion parameters in a 0.1 mol/l NaCl solution, depending on different concentrations of the V3 inhibitor

№	Концентрация, % / Concentration, %	$ b_a $, V/dec	$ b_c $, V/dec	$-E_{\text{corr}}$, мВ / mB	i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ / A/cm ²	K, мм/г / mm/g	Z, %	γ
1	0,0	0,280	0,101	808	93,508	0,6168	—	—
2	0,5	0,203	0,136	648	46,526	0,3069	50,24	2,01
3	1,0	0,193	0,132	588	42,247	0,2787	54,82	2,21
4	1,5	0,197	0,126	561	35,478	0,2340	62,06	2,64
5	2,0	0,220	0,096	458	22,821	0,1505	75,59	4,10
6	3,0	0,226	0,092	452	22,348	0,1474	76,10	4,18

Потенциометрическое исследование показало, что присутствие в 0,1 моль/л растворе NaCl ингибитора V3 при концентрации от 0,5 до 3 % ускоряет катодную и сильно замедляют анодную реакции, потенциал коррозии смещается при этом в положительную сторону. Защитная способность стали Ст3 от коррозии постепенно значительно увеличивается с концентрацией V3 от 0,5 до 2,0 % и достигает 75,59 % при концентрации 2 %; при концентрации V3 более 2 % защитная способность незначительно увеличивается. Это обусловлено тем, что при концентрации 2 % поверхность металлического образца практически полностью покрывается ингибитором. Дальнейшее повышение концентрации не приводит к значительному увеличению уровня покрытия стальной поверхности.



Р и с. 5. Изображение поверхности рабочего электрода стали Ст3 после электрохимического исследования при различных концентрациях V3: а) контроль; б) 0,5 %; в) 1,0 %; д) 1,5 %; е) 2,0 %; ф) 3,0 %

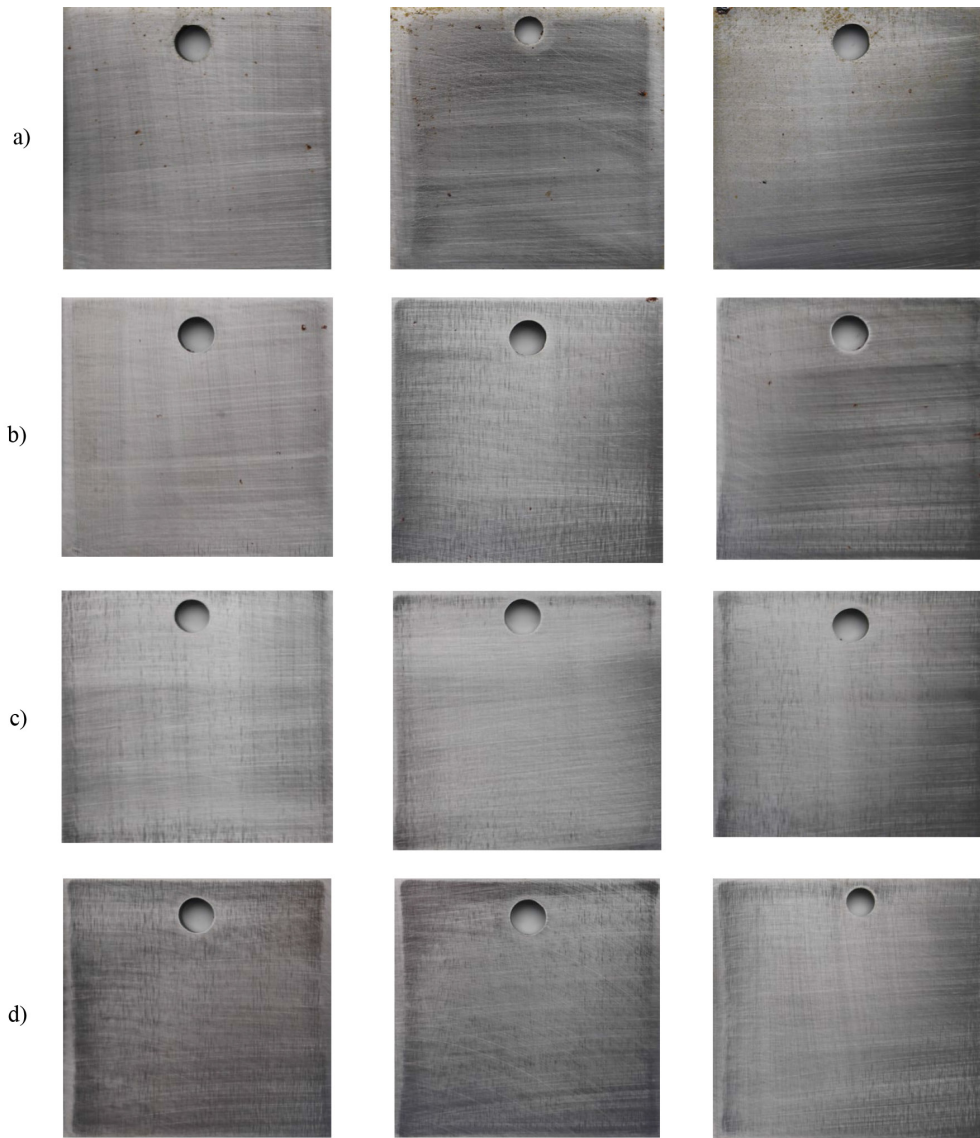
F i g. 5. Image of the surface of the St3 steel working electrode after electrochemical testing at various concentrations of V3: а) control; б) 0.5%; в) 1.0%; д) 1.5%; е) 2.0%; ф) 3.0%

Источник: фотографии для рисунков 5, 6 сделаны С. М. Гайдаром в Тропическом центре Социалистической Республики Вьетнам (10.12.2024 г.).

Source: the photos for figures 5 and 6 were taken during the study of S. M. Gaidar at the SVR Center on December 10, 2024.

Результаты испытаний методом ускоренного испытания на воздействие тепла и влаги с конденсацией влаги

Защитная способность от коррозии стали Ст3 ингибитором V3 при 100, 200, 300 г/м³ концентраций определялась методом ускоренных испытаний на воздействие тепла и влаги с конденсацией влаги.



Р и с. 6. Внешний вид образцов из стали Ст3 после ускоренных испытаний при различных концентрациях V3:

a) контроль; b) 100 г/м³; c) 200 г/м³; d) 300 г/м³

F i g. 6. Appearance of St3 steel samples after accelerated test at different V3 concentrations:

a) control; b) 100 g/m³; c) 200 g/m³; d) 300 g/m³

Результаты визуальной оценки показали, что на поверхности контрольных образцов появились первые признаки коррозии после двух циклов испытаний, после 20 циклов испытаний на поверхности образцов (рис. 6 а) образовались коррозионные пятна, коррозионные раковины, помутнение и потеря блеска; на поверхности испытуемых образцов при 100 г/м³ концентрации V3 первые очаги

коррозионного разрушения начали проявляться после 12 циклов, далее по окончании 20 циклов испытаний на образцах новых очагов не зафиксировано (рис. 6 б); на поверхности испытуемых образцов при 200 и 300 г/м³ концентрации V3 после 20 циклов испытаний нет признаков коррозии (рис. 6 с, d).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методики получения летучих ингибиторов коррозии черных металлов на основе этаноламина и борной кислоты, взятых в различных мольных соотношениях. Установлено, что наилучшую эффективность проявляет ингибитор, представляющий собой три(аминоэтил)борат (V3). Наибольший защитный эффект данное соединение показало в отношении стали Ст3.

Электрохимическая оценка защитной эффективности ЛИК на основе измерения поляризационных кривых в присутствии одного стимулятора коррозии коррелирует с результатами гравиметрических коррозионных испытаний. Высокая защитная эффективность позволяет применять полученный ингибитор для консервации изделий из черных и цветных металлов.

Несмотря на обширность рынка ингибиторов, создание новых защитных материалов не прекращается. Основной упор делается на универсальность защиты от атмосферной и микробиологической коррозии, а также на применение с широким спектром материалов и максимальным сроком действия. В связи с этим разработка новых современных составов, а также проведение лабораторных и натурных испытаний по определению их физико-химических и эксплуатационных свойств в условиях различного климата остается актуальным на сегодняшний день.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo Y., Rogov A., Hird A., Mingo B., Matthews A., Yerokhin A. Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium by Sawtooth Pulse Current. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127938. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127938>
2. Jiang L., Dong Y., Yuan Y., Zhou X., Liu Y., Meng X. Recent Advances of Metal–Organic Frameworks in Corrosion Protection: From Synthesis to Applications. *Chemical Engineering Journal*. 2022;430:132823. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132823>
3. Al-Amiery A.A., Rubaye A.Y.I., Kadhum A.A.H., Al-Azzawi W.K. Thiosemicarbazide and Its Derivatives as Promising Corrosion Inhibitors: A Mini-Review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):597–620. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-12>
4. Talat N.T., Dahadha A.A., Abunuwar M., Hussien A.A., Wafa'a Odeh. Polyethylene Glycol and Polyvinylpyrrolidone: Potential Green Corrosion Inhibitors for Copper in H₂SO₄ Solutions. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(1):215–243. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-13>
5. Osipenko M.A., Kasach A.A., Adamiec J., Zimowska M., Kurilo I.I., Kharytonau D.S. Corrosion Inhibition of Magnesium Alloy AZ31 in Chloride-Containing Solutions by Aqueous Permanganate. *Journal of Solid State Electrochem*. 2023;27:1847–1860. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05472-3>
6. Abdulhadi S., Mohammed A., Al-Azzawi W.K., Gaaz T., Kadhum A.A.H., Shaker L.M. и др. The Corrosion Inhibition Abilities of PVA and PVP Against the Corrosion of Mild Steel in Hydrochloric Acid. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):645–663. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-14>
7. Gao H., Li Q., Dai Y., Luo F., Zhang H.X. High Efficiency Corrosion Inhibitor 8-Hydroxyquinoline and Its Synergistic Effect with Sodium Dodecylbenzenesulphonate on AZ91D Magnesium Alloy. *Corrosion Science*. 2010;52(5):1603–1609. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.033>

8. Левашова В.И., Янгирова И.В., Казакова Е.В. Обзор ингибиторов коррозии на основе бор органических соединений. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;(6):21. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408> (дата обращения: 30.05.2025).
9. Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Петровский Д.И., Посулько И.А., Пикина А.М. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии. *Коррозия: материалы, защита*. 2021;(12):10–14. <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-12-10-14>
10. Келлер С., Рейнхард Г. Упаковочные материалы, содержащие летучие ингибиторы коррозии. Принципы защиты. *Коррозия: материалы, защита*. 2015;(8):24–34. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2304 (дата обращения: 30.05.2025).
11. Даниякин Н.В., Сигида А.А. Современные летучие ингибиторы атмосферной коррозии (обзор). *Auditorium*. 2017;1(13):131–137. URL: <https://auditorium.kursksu.ru/magazine/archive/number/66> (дата обращения: 30.05.2025).
12. Гончарова О.А., Лучкин А.Ю., Андреев Н.Н. Смесевые летучие ингибиторы коррозии черных металлов и универсальные препараты. *Коррозия: материалы, защита*. 2021;(2):33–40. <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-2-33-40>
13. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Шель Е.Ю., Шель Н.В., Князева Л.Г., Дорохов А.В. и др. Моделирование коррозионно-агрессивных атмосфер для оценки эффективности летучих ингибиторов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018;84(7):42–46. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-7-42-46>
14. Черемисина И.В. Защита металлов от атмосферной коррозии летучими ингибиторами. *Державинский форум*. 2018;2(6):151–159. <https://elibrary.ru/urjvde>
15. Зибер М., Лоаутнер С., Фасбендер Ф. Метод испытания и устройство для оценки эффективности летучих ингибиторов коррозии. *Коррозия: материалы, защита*. 2021;(2):41–48. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=3177 (дата обращения: 30.05.2025).
16. Трусов В.И. Некоторые итоги тензиметрического исследования летучих ингибиторов коррозии. *Журнал общей химии*. 2021;91(10):1479–1482. <https://doi.org/10.31857/S0044460X21100012>
17. Кузнецов Ю.И. Органические ингибиторы атмосферной коррозии. *Вестник ТГУ*. 2013;18(5):2126–2131. <https://elibrary.ru/qytsrf>
18. Гончарова О.А., Кузнецов Ю.И., Андреев Н.Н., Надькина Е.А. Формирование наноразмерных слоев на металле летучими органическими соединениями для повышения защиты от атмосферной коррозии. *Коррозия: материалы, защита*. 2014;(6):20–26. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2026 (дата обращения: 30.05.2025).
19. Коляда Л.Г., Кремнева А.В. Изучение антикоррозионных свойств комбинированных упаковочных материалов для металлопродукции. *Теория и технология металлургического производства*. 2014;2(15):105–108. URL: <https://ttmp.magtu.ru/doc/ttmp-2-2014.pdf> (дата обращения: 30.05.2025).
20. Андреев Н.Н., Гончарова О.А., Андреева Н.П., Максаева Л.Б., Петрунин М.А., Кузнецов Ю.И. Адсорбция паров летучего ингибитора ИФХАН-118 на железе и стали. *Коррозия: материалы, защита*. 2016;(2):28–31. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2393 (дата обращения: 30.05.2025).
21. Кузнецов Ю.И., Агафонкин А.В., Зель О.О. Летучие ингибиторы атмосферной коррозии металлов на основе азометинов. *Коррозия: материалы, защита*. 2009;(4):17–23. <https://elibrary.ru/kxjcxr>

REFERENCES

1. Guo Y., Rogov A., Hird A., Mingo B., Matthews A., Yerokhin A. Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium by Sawtooth Pulse Current. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127938. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127938>
2. Jiang L., Dong Y., Yuan Y., Zhou X., Liu Y., Meng X. Recent Advances of Metal–Organic Frameworks in Corrosion Protection: From Synthesis to Applications. *Chemical Engineering Journal*. 2022;430:132823. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132823>

3. Al-Amiery A.A., Rubaye A.Y.I., Kadhum A.A.H., Al-Azzawi W.K. Thiosemicarbazide and Its Derivatives as Promising Corrosion Inhibitors: A Mini-Review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):597–620. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-12>
4. Talat N.T., Dahadha A.A., Abunuwar M., Hussien A.A., Wafa'a Odeh. Polyethylene Glycol and Polyvinylpyrrolidone: Potential Green Corrosion Inhibitors for Copper in H_2SO_4 Solutions. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(1):215–243. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-13>
5. Osipenko M.A., Kasach A.A., Adamiec J., Zimowska M., Kurilo I.I., Kharytonau D.S. Corrosion Inhibition of Magnesium Alloy AZ31 in Chloride-Containing Solutions by Aqueous Permanganate. *Journal of Solid State Electrochem*. 2023;27:1847–1860. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05472-3>
6. Abdulhadi S., Mohammed A., Al-Azzawi W.K., Gaaz T., Kadhum A.A.H., Shaker L.M., et al. The Corrosion Inhibition Abilities of PVA and PVP Against the Corrosion of Mild Steel in Hydrochloric Acid. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023;12(2):645–663. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-14>
7. Gao H., Li Q., Dai Y., Luo F., Zhang H.X. High Efficiency Corrosion Inhibitor 8-Hydroxyquinoline and Its Synergistic Effect with Sodium Dodecylbenzenesulphonate on AZ91D Magnesium Alloy. *Corrosion Science*. 2010;52(5):1603–1609. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.033>
8. Levashova V.I., Yangirova I.V., Kazakova E.V. Review of Corrosion Inhibitor on the Based of Organobor on Compounds. *Modern Problems of Science and Education*. 2014;(6):21. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15408> (accessed 30.05.2025).
9. Gaidar S.M., Konoplev V.E., Petrovsky D.I., Posunko I.A., Pikina A.M. Investigation of the Synergistic Effect of Contact Inhibitors of Anodic and Cathodic Action in Protecting Steel from Corrosion. *Corrosion: Materials, Protection*. 2021;(12):10–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-12-10-14>
10. Keller S., Reinhard G. [Packaging Materials Containing Volatile Corrosion Inhibitors. Principles of Protection]. *Corrosion: Materials, Protection*. 2015;(8):24–34. (In Russ.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2304 (accessed 30.05.2025).
11. Danyakin N.V., Sigida A.A. Modern Atmospheric Volatile Corrosion Inhibitors (Overview) *Auditorium*. 2017;1(13):131–137. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://auditorium.kursksu.ru/magazine/archive/number/66> (accessed 30.05.2025).
12. Goncharova O.A. Luchkin A.Yu., Andreev N.N. Volatile Mix Corrosion Inhibitors of Ferrous Metals and Universal Preparations. *Corrosion: Materials, Protection*. 2021;(2):33–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-2-33-40>
13. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Shel E.Yu., Shel N.V., Knyazeva L.G., Dorokhov A.V., et al. Modeling of Corrosive Atmospheres for Evaluation of the Efficiency of Volatile Inhibitors. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2018;84(7):42–46. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-7-42-46>
14. Cheremisinina I.V. Protection of Metals Against Atmospheric Corrosion by Vapor-Phase Inhibitors. *Derzhavin Forum*. 2018;2(6):151–159. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/urjvde>
15. Sieber M., Lautner S., Fasbender F. Test Method and Device for Evaluation of Effective Volatile Corrosion Inhibitors. *Corrosion: Materials, Protection*. 2021;(2):41–48. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=3177 (accessed 30.05.2025)
16. Trusov V.I. Some Results of a Tensimetric Study of Volatile Corrosion Inhibitors. *Russian Journal of General Chemistry*. 2021;91(10):1479–1482. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0044460X21100012>
17. Kuznetsov Yu.I. Organic Inhibitors of Atmospheric Corrosion. *Vestnik TSU*. , 2013;18(5):2126–2131. <https://elibrary.ru/qytsrf>
18. Goncharova O.A., Kuznetsov Yu.I., Andreev N.N., Nadkina E.A. Formation of Nanoscale Layers on Metal by Volatile Organic Compounds to Enhance Protection Against Atmospheric Corrosion. *Corrosion: Materials, Protection*. 2014;(6):20–26. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2026 (accessed 30.05.2025).
19. Kolyada L.G., Kremneva A.V. Study of Anticorrosive Properties of Combined Packaging Materials for Metal Products. *The Theory and Process Engineering of Metallurgical Production*.

- 2014;2(15):105–108. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://ttmp.magtu.ru/doc/ttmp-2-2014.pdf> (accessed 30.05.2025).
20. Andreev N.N., Goncharova O.A., Andreeva N.P., Maksayeva L.B., Petrunin M.A., Kuznetsov Yu.I. Adsorption of Vapors of Volatile Inhibitor IFkHAN–118 on Iron and Steel. *Corrosion: Materials, Protection*. 2016;(2):28–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2393 (accessed 30.05.2025).
21. Kuznetsov Yu.I., Agafonkin A.V., Zel O.O. [Volatile Inhibitors of Atmospheric Corrosion of Metals Based on Azomethines]. *Corrosion: Materials, Protection*. 2009;(4):17–23. (In Russ.) <https://elibrary.ru/kxjcxr>

Об авторах:

Куанг Хоанг Дык, кандидат химических наук, докторант Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); заместитель директора по науке Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Южное отделение) (650000, Вьетнам, г. Ханой, Нгиа До, Кау Зай, ул. Нгуен Ван Хуен, д. 63), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, Scopus ID: 57201699580, quanghoang1510@gmail.com

Гайдар Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); ведущий научный сотрудник Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, Researcher ID: I-4723-2018, Scopus ID: 57191589797, techmash@rgau-msha.ru

Пикина Анна Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии машиностроения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); старший научный сотрудник Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>, Scopus ID: 57936447900, pikina@rgau-msha.ru

Лапсарь Оксана Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии машиностроения Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49); научный сотрудник Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2883-8627>, Researcher ID: OYF-5859-2025, olapsary@rgau-msha.ru

Нгуен Тхи Тху Суан, магистрант Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Южное отделение) (650000, Вьетнам, г. Ханой, Нгиа До, Кау Зай, ул. Нгуен Ван Хуен, д. 63), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1594-3396>, nguyenthithuxuan92@gmail.ru

Вклад авторов:

Х. Д. Куанг – формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

С. М. Гайдар – формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

А. М. Пикина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение сбора данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования.

О. М. Лапсарь – осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Т. Т. С. Нгуен – осуществление научно-исследовательского процесса, включая сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 04.06.2025; поступила после рецензирования 11.09.2025;
принята к публикации 08.10.2025*

About the authors:

Hoang Duc Quang, PhD (Chem.), Doctoral Student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Deputy Director for Science at the Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center (South Branch) (650000, Vietnam, Hanoi, Nghia Do, Cau Zai, Nguyen Van Huyen St, 63), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6487-8782>, quanghoang1510@gmail.com

Sergey M. Gaidar, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Leading Researcher, The Kosygin State University of Russia (1 bld, 33 Sadovnicheskaya St., Moscow 117997, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>, Scopus ID: 57191589797, Researcher ID: I-4723-2018, techmash@rgau-msha.ru

Anna M. Pikina, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Senior Researcher, The Kosygin State University of Russia (1 bld, 33 Sadovnicheskaya St., Moscow 117997, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0237-0534>, pikina@rgau-msha.ru

Oksana M. Lapsar, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation); Researcher, The Kosygin State University of Russia (Technologies. Design. Art) (1 bld, 33 Sadovnicheskaya St., Moscow 117997, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2883-8627>, olapsary@rgau-msha.ru

Nguyen Thi Thu Xuan, Master's Student, Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center (South Branch) (650000, Vietnam, Hanoi, Nghia Do, Cau Zai, Nguyen Van Huyen St, 63). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1594-3396>, nguyenthithuxuan92@gmail.ru

Authors contribution:

H. D. Quang – formulating the study idea, goals, and objectives; manuscript preparing: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by the research team members, including at the pre- and post-publication stages.

S. M. Gaidar – formulating the study idea, goals, and objectives; manuscript preparing: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by the research team members, including at the pre- and post-publication stages.

A. M. Pikina – conducting the study, including data collection; manuscript preparing: visualizing the study results.

O. M. Lapsar – conducting the study, including data collection; manuscript preparing: visualizing the study results and the data obtained.

T. T. X. Nguyen – conducting the study, including data collection; manuscript preparing preparation: visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 04.06.2025; revised 11.09.2025; accepted 08.10.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.623-640>EDN: <https://elibrary.ru/bdonzc>

УДК / UDK 621.92

Оригинальная статья / Original article

Влияние технологических факторов центробежно-планетарной обработки на шероховатость внутренних каналов мелкоразмерных деталей

А. Е. Зверовщиков¹, А. В. Стешкин², П. А. Гурин¹✉,
Н. А. Миронычев¹, Е. В. Зотов¹, В. А. Скрябин¹

¹ Пензенский государственный университет,

г. Пенза, Российская Федерация

² Федеральный научно-производственный центр

«Производственное объединение “Старт” им. М. В. Проценко»,

г. Заречный, Российская Федерация

✉ sbgurin_pavel@list.ru

Аннотация

Введение. Обработка мелкоразмерных деталей с внутренними каналами является сложной технологической задачей, которая решается с применением дисперсных шлифовальных материалов. Требуемого качества поверхностей внутренних каналов можно достичь при использовании технологии центробежно-планетарной обработки с корректным выбором технологических режимов, для которой необходимо разработать теоретическую базу.

Цель исследования. Теоретически обосновать возможности центробежно-планетарной обработки поверхностей мелкоразмерных каналов на основе определения параметров контактного взаимодействия при скользящем ударе рабочего тела.

Материалы и методы. Для определения диапазона технологических характеристик оборудования использовалась разработанная программа «Канал», исходные данные для которой были рассчитаны при помощи компьютерного моделирования контактного взаимодействия в программном пакете ANSYS WORKBENCH. Экспериментальные исследования осуществлялись на установке Д7Н.650.00.00. Использовались образцы мелкоразмерных деталей из латуни ДКРНТ 30 НД Л63 ГОСТ 2060-2006 с покрытием из гальванического серебра. В качестве рабочих тел применялась дробь CHRONITAL фирмы Vulkan Inox GmbH (Германия).

Результаты исследования. Анализ результатов расчетов в программе ANSYS позволил определить диапазон скоростей рабочих тел, при которых деформации основы детали остаются в пределах нормы. Рассчитанный диапазон скоростей послужил исходными данными для расчета технологических факторов обработки в программе «Канал», благодаря чему получены необходимые параметры для теоретического расчета шероховатости поверхности. Для определения экспериментальных значений шероховатости проведены исследования, позволившие установить эмпирическую зависимость. Показана хорошая сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований.

© Зверовщиков А. Е., Стешкин А. В., Гурин П. А., Миронычев Н. А., Зотов Е. В., Скрябин В. А., 2025



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

Обсуждение и заключение. Для технологической подготовки производства теоретически описаны и экспериментально подтверждены взаимосвязи параметров шероховатости обрабатываемой внутренней поверхности с покрытием и технологических режимов центробежно-планетарной обработки. На основе результатов исследований разработан способ обработки внутренних каналов деталей с поверхностями сложного профиля, направленный на повышение эффективности их изготовления с обеспечением требуемого качества поверхностей. Предлагаемая методика является основой для проведения технологической подготовки производства деталей с внутренними поверхностями, имеющими гальваническое покрытие из серебра. Дальнейшие исследования в этой области предполагают расширение гаммы материалов покрытий, твердость которых по-разному соотносится с твердостью основного материала.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, мелкоразмерные детали, гальваническое покрытие, центробежно-планетарная обработка, внутренний канал детали, моделирование контактного взаимодействия, напряженно-деформированное состояние, скорость рабочих тел, частота вращения, передаточное отношение, контактное взаимодействие

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта «Научные принципы процессов формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (№ соглашения 0748-2020-0013) в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 2020 г.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Зверовщиков А.Е., Шешкин А.В., Гурин П.А., Миронычев Н.А., Зотов Е.В., Скрябин В.А. Влияние технологических факторов центробежно-планетарной обработки на шероховатость внутренних каналов мелкоразмерных деталей. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):623–640. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.623-640>

The Influence of Technological Factors of Centrifugal Planetary Treating the Roughness of the Internal Channels of Small-Sized Parts

A. E. Zverovshchikov^a, A. V. Steshkin^b, P. A. Gurin^a✉,
N. A. Mironychev^a, E. V. Zotov^a, V. A. Skryabin^a

^a Penza State University,
Penza, Russian Federation

^b Production Association “Start” named after M. V. Protsenko,
Zarechny, Russian Federation

✉ sbgurin_pavel@list.ru

Abstract

Introduction. Treating small-sized parts having internal channels is a complex technological task that can be solved using dispersed grinding materials. The required surface quality of the internal channels can be achieved by using centrifugal planetary treatment technology with the correct choice of technological modes. It is necessary to develop a theoretical framework for this technology.

Aim of the Study. The study is aimed at substantiating theoretically the possibilities of centrifugal planetary surface treatment of small-sized channels based on the determination of contact interaction parameters upon a sliding impact of the working material.

Materials and Methods. To determine the range of equipment technological characteristics, there was used the developed program “Channel”, the initial data for which were calculated using computer simulation of contact interaction in the software package ANSYS WORKBENCH. Experimental studies were carried out on the installation D7H.650.00.00. There were used the samples of small-sized brass parts DKRNT 30 ND L63 GOST 2060-2006 with silver electroplated coating. CHRONITAL – CAST Stainless Steel Shot by the firm Vulkan Inox GmbH (Germany) was used as working material.

Results. The calculation results was analyzed in the program ANSYS that made it possible to determine the range of working material speed at which deformation of the part base was within the normal range. The calculated speed range was used as the initial data for calculating the technological factors of processing in the program “Channel” that provided the necessary data for the theoretical calculation of surface roughness. To determine the experimental roughness values, there were carried out the studies, which allowed us to found an empirical relationship. There has been shown the convergence between the results of theoretical and experimental studies.

Discussion and Conclusion. For the technological preparation of manufacturing, there have been theoretically described and experimentally confirmed the relationships between the roughness parameters of the coated inner surface under treating and the technological modes of centrifugal planetary treatment. Based on the study results, there has been developed a method for treating internal channels of parts with complex profile surfaces. This method is aimed at increasing their manufacturing efficiency while ensuring the required surface quality. The proposed method is the basis for the technological preparation of manufacturing parts with internal surfaces having a silver electroplated coating. Further research in this area suggests expanding the range of coating materials, the hardness of which correlates differently with the hardness of the base material.

Keywords: surface roughness, small-sized parts, electroplating, centrifugal planetary treatment, internal channel of the part, modeling of contact interaction, stress-strain state, speed of working material, rotational speed, gear ratio, contact interaction

Funding: the work was carried out within the framework of the project “Scientific principles of the processes of formation of heterogeneous structures by methods of physico-chemical dispersion” (Agreement No. 0748-2020-0013) within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 2020

Acknowledgements: the authors express their gratitude to anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

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

For citation: Zverovshchikov A.E., Steshkin A.V., Gurin P.A., Mironychev N.A., Zotov E.V., Skryabin V.A. The Influence of Technological Factors of Centrifugal Planetary Treating the Roughness of the Internal Channels of Small-Sized Parts. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):623–640. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.623-640>

ВВЕДЕНИЕ

Мелкогабаритные детали с внутренними поверхностями каналов переменного сечения находят широкое применение в машиностроении, приборостроении и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Качество таких поверхностей, включая их шероховатость и равномерность нанесенных покрытий, является критически важным параметром, определяющим надежность и долговечность деталей. Однако достижение требуемого уровня качества в условиях сложной геометрии и малых размеров каналов сопряжено с рядом технологических проблем¹.

¹ Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкогабаритных деталях при центробежной обработке: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза; 2022. 212 с.

Одной из наиболее сложных задач является обработка нецилиндрических внутренних каналов, покрытых тонкими функциональными покрытиями, которые требуют минимальных припусков на обработку, что ограничивает использование традиционных методов отделки. Это особенно важно в условиях, когда необходимо обеспечить высокую точность и низкую себестоимость обработки. Применение традиционных методов обработки, таких как шлифование или полирование, оказывается затруднительным из-за недостаточной доступности инструмента и риска повреждения покрытий. В связи с этим актуальность поиска новых подходов к обработке внутренних каналов мелкоразмерных деталей продолжает расти.

Среди перспективных методов отделочной обработки особое место занимает центробежно-планетарная обработка, основанная на использовании абразивных и деформирующих рабочих сред² [1]. В процессе такой обработки инерционные силы обеспечивают эффективное формообразование поверхности, позволяя снизить трудоемкость отделочных операций и повысить стабильность качества. Однако выбор оптимальных технологических параметров обработки остается открытым вопросом, требующим теоретического и экспериментального подхода [2].

Настоящая работа посвящена изучению технологических факторов (частота вращения водила, частота вращения контейнеров, степень заполнения контейнеров, время обработки), влияющих на качество поверхности внутренних каналов мелкоразмерных деталей, обработанных на центробежно-планетарной установке. В частности, при центробежной обработке следует обеспечить решение следующих технологических задач³:

1) напряжения в зоне контакта при воздействии на поверхность рабочими телами (шарами) достаточны для пластической деформации выступов микронеровностей покрытия из серебра⁴;

2) напряжения в материале латунной подложки (основы) меньше значения ее предела текучести [3] (менее 150 МПа);

3) величина пластической деформации материала покрытия не превышает 75 % высоты неровностей поверхности по параметру R_{\max} , т. е. не более 3,4 мкм.

Выполнения этих условий можно достигнуть путем управления скоростями рабочих тел в момент контакта с деталью, что теоретически определено и проанализировано в САЕ-среде с помощью разработанной в ходе исследования программы «Канал».

После этого необходимо провести расчеты теоретических (прогнозируемых) значений шероховатости поверхности, получаемых при обработке деталей с ранее определенными значениями основных факторов, и подтвердить эти расчеты экспериментально.

Цель исследования – теоретическое обоснование возможности подготовки поверхностей мелкоразмерных каналов сечением менее 5 мм методом центробежно-

² Зверовщиков А.Е. Многофункциональная центробежно-планетарная обработка: моногр. М.: ИНФРА-М; 2013. 175 с.

³ Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.

⁴ Там же.

планетарной обработки на основе определения параметров контактного взаимодействия при скользящем ударе рабочего тела.

Задачи исследования: выработка критерия допустимости деформационного воздействия на поверхности с покрытием; раскрытие взаимосвязи между контактным воздействием рабочего тела на обрабатываемую поверхность и режимами центробежно-планетарного движения заготовки.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для обеспечения требуемых значений шероховатости ($Ra = 0,67$ мкм) внутренних поверхностей малогабаритных деталей известны разные методы обработки, среди которых можно выделить электроплазменную обработку, абразивную обработку эластичным инструментом, химическое и электрохимическое полирование, абразивную и деформационную обработку свободным материалом. Наличие покрытия на подобных поверхностях создает дополнительные сложности, которые требуют от технолога решения задач, связанных с меньшей прочностью материала адгезионной зоны покрытия (в отличие от однородного материала)⁵.

Используют известные методы обработки отверстий деформируемым инструментом, который позволяет повторять форму поверхности [4; 5]. Проблема выбора подобных методов для решения поставленной задачи заключается в невозможности обработки малоразмерных отверстий.

Абразивную обработку с использованием цилиндрического гибкого режущего инструмента из проволоки, состоящей из одной или нескольких более мелких проволок, сплетенных между собой, с нанесенным абразивным слоем также используют для обработки мелких фасонных поверхностей [6]. Однако подобный инструмент имеет невысокую проникающую способность и не позволяет произвести обработку сопряжений поверхностей.

Наличие покрытия из медьсодержащих и алюминиевых сплавов или серебра не позволяет использовать и электроплазменную обработку [7]. Равномерность обработки будет значительно зависеть от структурной и химической неравномерности материала.

Заменить механическое полирование можно химическим и электрохимическим полированием различными растворами, содержащими активные добавки⁶. Основное преимущество электрохимического полирования [8] состоит в возможности обеспечения товарного вида и приобретаемого блеска за счет достижения шероховатости поверхности до $Ra 0,1$ мкм. Однако неоднозначное формирование качества и структуры поверхностного слоя, а также риск появления коррозии указывают на недостатки химического и электрохимического полирования [9].

Внутренние полости деталей можно обрабатывать свободным инструментом (абразивным или неабразивным материалом), который совместно с технологической жидкостью перемещается в канале под действием приложенных сил. Часто используется вибрационная обработка отверстий деталей деформирующими или

⁵ Зверовщиков А.Е. Многофункциональная центробежно-планетарная обработка.

⁶ Липкин Я.Н. Химическое полирование металлов. М.: Машиностроение; 1988. 111 с.

абразивными средами [10; 11]. Основная сложность использования подобных методов заключается в невозможности достичь равномерной обработки по контуру мелкогабаритного отверстия сложной конфигурации.

Внутренние поверхности можно шлифовать путем подачи обрабатывающей среды под давлением через отверстие детали. Этот способ реализуется с применением устройства для абразивно-экструзионной обработки⁷.

Также внутренние поверхности деталей обрабатываются с помощью центробежно-планетарной обработки, когда жидкость с абразивными частицами загружается в контейнер, которому задают планетарное движение. Данный способ относится к методу обработки уплотненным шлифовальным материалом, разработанному и исследованному научной школой А. Н. Мартынова⁸.

Обработка деталей с мелкогабаритными каналами сложной формы (особенно в поперечном сечении) подобными способами практически исключается, поскольку невозможно обеспечить равномерную обработку по контуру детали. При обработке абразивным инструментом происходит шаржирование поверхности продуктами износа и микростружкой, что недопустимо для выполнения поставленных задач. Кроме того, при обработке поверхностей с покрытием неизбежно удаление некоторого припуска, уменьшающего толщину покрытия⁹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является технология обработки внутренних поверхностей деталей с покрытием деформирующими рабочими телами.

Основной принцип нового метода обработки заключается в следующем. Обрабатываемые мелкогабаритные детали устанавливают в цилиндрический контейнер планетарной установки радиально с использованием специального приспособления. В полость канала детали загружают технологическую жидкость с рабочими телами (шарами) и закрывают полость технологической заглушкой. Затем контейнеру с деталями сообщают планетарное движение. Рабочие тела, перемещаясь в канале детали, контактируют с поверхностью покрытия и производят обработку.

При помощи технологии имитационного моделирования выявлены требуемые габариты экспериментальной установки [12–14], влияющие на скорости перемещения рабочих тел в контейнере. Наиболее эффективным методом моделирования в рассматриваемом случае является метод конечных элементов. Из имеющихся в настоящее время средств моделирования динамики контактного взаимодействия пакет ANSYS WORKBENCH [15–17] определен как наиболее продуктивный. Главной задачей моделирования был расчет скоростей удара скольжения, при

⁷ Шаповал А.Н., Пивоваров М.Н., Золотарев Г.Р., Залевский В.А., Зленко А.А., Сытник А.А. и др. Устройство для обработки деталей абразивной массой, подаваемой под давлением. Авторское свидетельство 865643 СССР. 23 сентября 1981. <https://www.elibrary.ru/porhdz>

⁸ Мартынов А.Н., Зверовщиков Е.З., Зверовщиков В.З., Зверовщиков А.Е., Афонин М.Д., Денисов Ю.В. и др. Способ центробежной абразивной обработки деталей и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство 1705040 СССР. 15 января 1992. <https://www.elibrary.ru/ddhfdad>

⁹ Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкогабаритных деталях при центробежной обработке.

которых рабочие тела деформируют внутреннюю поверхность изделия в требуемых пределах.

В разработанных 3D-моделях заложена исходная шероховатость основы детали и покрытия ($R_{\max} = 3$ мкм для покрытия и $R_{\max} = 7$ мкм для основы). Адгезия в присутствии жидкости считалась незначимой.

Плотность покрытия из серебра составляет $10\,500\text{ кг/м}^3$, латунной основы детали – $8\,800\text{ кг/м}^3$, стали – $7\,850\text{ кг/м}^3$. Модуль упругости для серебра – $85\,000\text{ МПа}$, для латуни – $80\,000\text{ МПа}$ и для стали – $200\,000\text{ МПа}$. Коэффициент Пуассона для серебра и латуни – $0,37$, для стали – $0,3$. Предел текучести – $1\,382\text{ МПа}$ для серебра и для латуни – 150 МПа . Модуль упрочнения серебра и латуни – 500 МПа .

При подобных исследованиях основную проблему представляет моделирование сцепляемости покрытия и основания¹⁰. В работе принято допущение, что сцепляемость покрытия и основания не влияет на результаты вычислений. Они являются элементами с общей топологией, но разными материалами для образования общей сетки конечных элементов.

При моделировании исследуемая деталь жестко фиксировалась по нижней поверхности, а рабочему телу задавалась скорость движения под углом $\alpha = 15^\circ$ к поверхности детали.

Разбиение на сетку конечных элементов происходит программно-управляемым способом.

Рассматривался единичный контакт рабочего тела с поверхностью детали, для этого было выбрано время наблюдения $2 \cdot 10^{-6}\text{ с}$.

Скорость V и диаметр D рабочего тела приняты в качестве входных факторов виртуального эксперимента. Откликами служили предельная величина деформации h верхнего слоя покрытия [18; 19] и основы детали. Кроме того, оценивались напряжения по фон Мизесу [20; 21].

Программное обеспечение «Канал»¹¹ позволило определить значения частот вращения планетарного механизма и коэффициента загрузки контейнера. Эти параметры обеспечивали расчетные скорости контактного взаимодействия рабочих тел с поверхностью.

Теоретическое прогнозирование шероховатости при пластическом деформировании поверхности предполагает изменения величины опорной площади контактирующих тел как функцию расстояния между ними¹². По известной методике в качестве критерия принят показатель тангенса гладкости поверхности. Ввели параметр γ , зависящий от опорной длины профиля $t_p(p)$, который является ключевым для контактного взаимодействия.

¹⁰ Шешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.

¹¹ Шешкин А.В., Зверовщиков А.Е. Программа для моделирования объемной обработки внутренних полостей деталей в контейнерах с планетарным вращением «Канал.ехе». Свидетельство о государственной регистрации № И121016120711 Российская Федерация. № И121016120711; заявл.; опубл. 16.10.2012. <https://clck.ru/3QW2ET>

¹² Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы; 1962. 383 с.

Параметр Ra деформируемой поверхности можно рассчитать по формуле (1)¹³:

$$Ra = \frac{\left(Rz - \sqrt[3]{\frac{6q_c}{k\gamma_1\gamma_2}} + 240 \frac{\sigma^2}{E^2} R \right)}{K}, \quad (1)$$

где Rz – исходная шероховатость поверхности детали, м; q_c – давление по контуру, Па; k – приведенный коэффициент жесткости, Н/м³; γ_1, γ_2 – параметры, определяемые по функции относительной опорной длины профиля $t_p(p)$ для поверхностей обрабатываемой детали и индентора (стального рабочего тела); σ – предел текучести материала покрытия детали, Па; R – радиус рабочего тела, м; E – модуль упругости материала, Па; K – коэффициент (для отделочных методов обработки $K = 4,5 - 5$).

Для эмпирического подтверждения достигаемого качества поверхности использован центробежно-планетарный стенд Д7Н.650.00.00, обеспечивавший в пределе 60-кратное утяжеление загрузки и рабочих тел.

В качестве модельных образцов применялись конфигурационно сходные комплексные детали из материала ДКРНТ 30 НД Л63 ГОСТ 2060-2006¹⁴ с микронеровностями поверхности в пределах Ra 0,95 мкм. На образцах использовано гальванически осажденное покрытие из серебра.

Рабочими телами объемной среды служила литая дробь сферической формы CHRONITAL фирмы Vulkan Inox GmbH (Германия), выполненная из высоколегированной стали. Этиловый спирт по ГОСТ 5962-2013¹⁵ применялся при обработке в качестве смазочно-охлаждающего технологического средства.

Оценка высоты микронеровностей проведена профилометром Mitutoyo SurfTest SJ-410 (Япония). Измерение параметров шероховатости производилось по ГОСТ 27964-88, параметры шероховатости определялись по ГОСТ 2789-73¹⁶.

План эксперимента составлен по известной методике¹⁷. Для экспериментальной проверки полученных теоретических данных выполнены однофакторные эксперименты.

Входными факторами эксперимента служили передаточное отношение z (уровни факторов от 1,1 до 1,9; интервал варьирования 0,2); степень заполнения полости волновода C (уровни факторов от 20 до 60 %; интервал варьирования 10 %); частота вращения вала n_1 (уровни факторов от 60 до 140 об/мин; интервал варьирования 20 об/мин); время обработки t (уровни факторов от 2 до 10 мин; интервал варьирования 2 мин), в пределах варьирования которых, по расчетам в программе ANSYS и в программном обеспечении «Канал», должны были обеспечить расчетные значения шероховатости по формуле (1)¹⁸.

¹³ Гурин П.А. Проектирование технологии отделочно-упрочняющей центробежной обработки на основе имитационного моделирования: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза; 2013. 222 с.

¹⁴ ГОСТ 2060-2006. Прутки латунные. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048967> (дата обращения: 21.02.2025).

¹⁵ ГОСТ 5962-2013. Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103298> (дата обращения: 21.02.2025).

¹⁶ ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003160> (дата обращения: 21.02.2025).

¹⁷ Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента: учеб. пособие. Свердловск: Свердловское изд. УПИ им. С.М. Кирова; 1975. 152 с.

¹⁸ Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.

Экспериментальная модель по методике планирования эксперимента¹⁹ для шероховатости Ra после деформационного воздействия приняла вид:

$$Ra = C_R \cdot z^x \cdot C^y \cdot n_1^z \cdot t^q, \quad (2)$$

где C_R – общий коэффициент эмпирической модели; x, y, z, q – показатели степени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов виртуального эксперимента показал, что напряжения в зоне контакта не достигают напряжений разрушения для материала покрытия [22; 23]. Максимальное напряжение варьируется от 310 до 580 МПа, среднее напряжение – от 4 до 53 МПа при скоростях рабочего тела диаметром 0,2 мм от 10 до 70 м/с. Максимальные напряжения в материале основы детали составили от 140 до 440 МПа, средние значения напряжения от 5 до 52 МПа при скоростях рабочего тела от 10 до 70 м/с. Поэтому не следует ожидать разрушения поверхностного слоя покрытия и тем более основного материала. Однако контактные воздействия достаточны для пластической деформации серебра, что подтверждает реальность смятия микронеровностей обработкой пластическим деформированием [24–26].

Предельная величина деформации покрытия составила от 2,3 до 7,3 мкм при скоростях рабочего тела от 10 до 70 м/с. Максимально допустимая деформация, равная 3,4 мкм, была превышена при скорости рабочего тела 24 м/с.

Предельная величина деформации основы детали колеблется от 0,2 до 4,8 мкм при тех же скоростях. Скорости рабочих тел более 20 м/с приводят к деформации более 1 мкм.

Предельные скорости в диапазоне от 30 до 70 м/с создадут контактные напряжения, достаточные для деформации как покрытия, так и основы. Поэтому диапазон скоростей рабочих тел, при которых деформации основы детали остаются незначительными, следует принять от 10 до 20 м/с. Результат деформации покрытия, спрогнозированный для данного диапазона при контакте с рабочим телом диаметром $D = 0,2$ мм со скоростью $V = 20$ м/с, приведен на рисунке 1.

Изначально полученные значения скоростей использовались в качестве исходных данных для расчета технологических факторов обработки в ПО «Канал», значения которых составили: передаточное отношение z варьируется в диапазоне от 1,1 до 1,9; частота вращения водила n_1 – от 60 до 140 об/мин, степень заполнения C рабочими телами полости волновода – от 20 до 60 %.

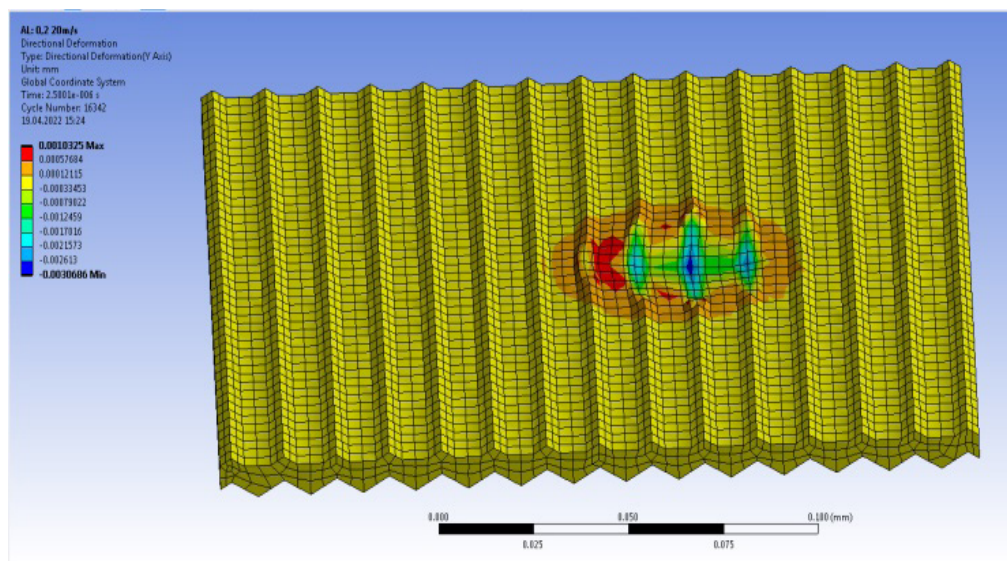
Проведенные экспериментальные исследования позволили получить эмпирическую зависимость для определения шероховатости Ra обработанных поверхностей по методике²⁰.

$$Ra = 2,2 \cdot z^{0,7} \cdot C^{0,330} \cdot n_1^{-0,380} \cdot t^{-0,210}. \quad (3)$$

¹⁹ Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента.

²⁰ Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.

Для графической интерпретации полученных результатов построены однофакторные зависимости путем стабилизации значений остальных факторов на постоянном нулевом уровне ($z = 1,5$; $C = 40\%$; $n_1 = 100$ об/мин; $t = 6$ мин).



Р и с. 1. Деформация покрытия рабочей поверхности детали при диаметре $D = 0,2$ мм со скоростью $V = 20$ м/с

F i g. 1. Deformation of the coating of the working surface of the part at the diameter $D = 0.2$ mm with a velocity $V = 20$ m/s

Источник: рисунок сделан авторами статьи в программе Ansys.

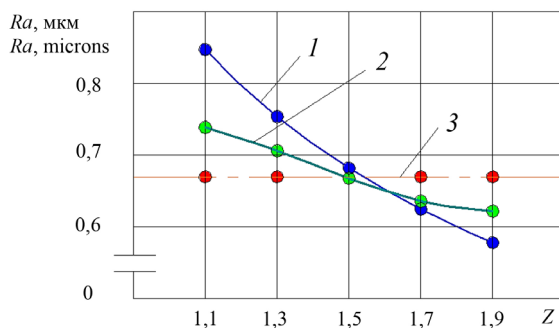
Source: the drawing is made by the authors of the article in the Ansys program.

На рисунке 2 в виде прямой 3 установлен лимитирующий уровень результирующей шероховатости $Ra = 0,67$ мкм, который задан техническими требованиями на изделие и определяет качественные характеристики поверхности.

Выполненные исследования влияния передаточного отношения на результирующую шероховатость позволили утверждать, что значительное изменение динамического воздействия шаров с ростом их скорости за счет изменения частоты вращения контейнера существенно увеличивает пластическую деформацию выступающих неровностей обрабатываемой поверхности (рис. 2)²¹.

Рассчитанная по разработанной теоретической модели (1) шероховатость Ra показывает удовлетворительную сходимость с результатами выполненных экспериментов (3) (рис. 2 зависимости 1 и 2) при среднеквадратическом отклонении $S = 0,057$ и критерии Фишера $F = 4,8$. Среднеквадратическое отклонение рассчитано как корень из среднего арифметического квадратов разности экспериментальных и теоретических значений.

²¹ Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.



Р и с. 2. Зависимости шероховатости поверхности Ra от передаточного отношения z , полученные на режимах обработки ($n_1 = 100$ об/мин; $C = 40\%$; $t = 6$ мин):
 1 – данные эксперимента; 2 – расчетная зависимость;
 3 – лимитирующий уровень шероховатости Ra

F i g. 2. Dependences of surface roughness Ra on the gear ratio z , obtained in treating modes ($n_1 = 100$ r/min; $C = 40\%$; $t = 6$ min):
 1 – experimental data; 2 – calculated dependence; 3 – limiting roughness level Ra

Источник: рисунок взят из автореферата диссертации А. В. Стешкина²².

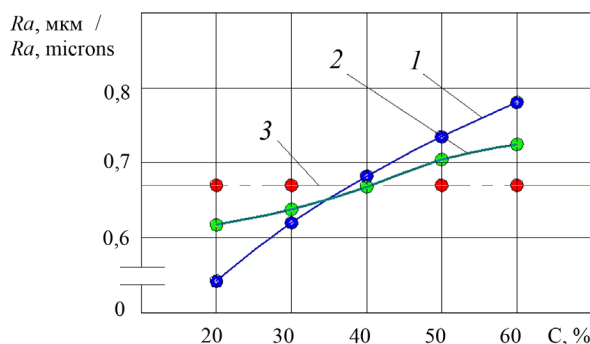
Source: the drawing is taken from the abstract of A.V. Steshkin's²² dissertation.

С ростом заполнения контейнера рабочими шарами шероховатость поверхности Ra практически не изменяется в сравнении с исходной шероховатостью, измеренной до обработки (рис. 3). Ограниченное внутреннее пространство приводит к уменьшению средних скоростей контакта и динамического воздействия рабочих тел на обрабатываемую поверхность, что объясняется в значительной мере ростом угла их траектории движения по отношению к внутренней поверхности. Заметное снижение шероховатости отмечается при степени заполнения внутренней полости канала шарами на 20–30 %. Данные эксперимента по модели (3) (рис. 3 зависимость 1) и результаты вычислений по модели (1) адекватно соотносятся по среднеквадратическому отклонению $S = 0,045$. Критерий Фишера $F = 4,4$.

Для определения критических деформаций покрытия на образцах использовалась программа ANSYS. В результате расчета установлены предельные допустимые скорости на уровне 20 м/с при воздействии на поверхность покрытия стального тела размером 0,2 мм. Расчеты с применением ПО «Канал» показали, что такая скорость достигается при частоте вращения водила 123 об/мин. По результатам выполненных исследований установлен рабочий диапазон частот вращения водила – 105...120 об/мин.

При увеличении времени обработки t происходит снижение высоты неровностей и достигается заданный уровень параметра шероховатости Ra на обрабатываемых деталях. Длительное, в пределах 6–10 мин, и весьма интенсивное динамическое воздействие рабочих тел на внутреннюю поверхность деталей приводит к снижению высоты неровностей, улучшает качественные характеристики (рис. 4).

²² Стешкин А.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения в мелкоразмерных деталях при центробежной обработке.



Р и с. 3. Зависимости шероховатости поверхности Ra от степени заполнения контейнера C , полученные на режимах обработки ($n_1 = 100$ об/мин; $z = 1,5$; $t = 6$ мин):

1 – данные эксперимента; 2 – расчетная зависимость;

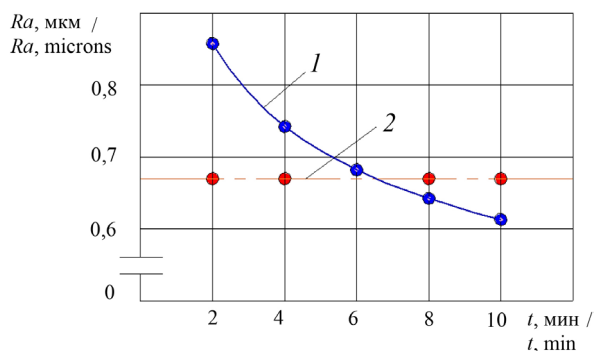
3 – лимитирующий уровень шероховатости Ra

F i g. 3. Dependences of surface roughness Ra on the degree of filling of container C , obtained in processing modes ($n_1 = 100$ r/min; $z = 1.5$; $t = 6$ min):

1 – experimental data; 2 – calculated dependence; 3 – limiting roughness level Ra

Источник: рисунки 3–4 составлены авторами статьи.

Source: the drawing is made by the authors of the article.



Р и с. 4. Зависимости шероховатости поверхности Ra от времени обработки t , полученные на режимах обработки ($n_1 = 100$ об/мин; $C = 40\%$; $z = 1,5$):

1 – данные эксперимента; 2 – граница допустимой шероховатости Ra

F i g. 4. Dependences of the surface roughness Ra on the treating time t , obtained in the treating modes ($n_1 = 100$ r/min; $C = 40\%$; $z = 1.5$):

1 – experimental data; 2 – the limit of the permissible roughness of Ra

Опытным путем было установлено, что за указанный промежуток времени обеспечивается заданная техническими требованиями шероховатость, и превышение отмеченного времени экономически неэффективно. Анализ данных по времени обработки также показывает, что график переходит в стадию горизонтального выравнивания с приближением к значению шероховатости, которое характерно для данного метода обработки, отражая тем самым окончание создания заданного регулярного рабочего рельефа.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили возможность обеспечения требуемых параметров шероховатости сложнопрофильных внутренних поверхностей малого размера с покрытием посредством совершенствования центробежно-планетарной обработки.

Моделирование позволило определить скорости рабочих тел (шаров диаметром 0,2 мм), необходимые для пластической деформации покрытия из серебра без повреждения основы детали. При скорости рабочего тела более 24 м/с предельная деформация покрытия превышала допустимое значение в 3,4 мкм. При скоростях более 20 м/с деформация основы детали превосходила 1 мкм.

Максимальное напряжение в материале покрытия изменяется в пределах от 310 до 580 МПа, среднее напряжение – от 4 до 53 МПа при скоростях рабочего тела от 10 до 70 м/с. Максимальные напряжения в материале основы детали составили от 120 до 440 МПа, средние значения напряжения – от 5 до 52 МПа. Напряжения более 150 МПа (предел текучести латунной основы детали) наблюдались при скоростях рабочих тел более 20 м/с.

Было решено, что необходимо поддерживать диапазон скоростей рабочих тел от 10 до 20 м/с. На основе полученных данных с использованием программы «Канал» определены технологические факторы обработки, позволяющие обеспечить поддержание требуемых скоростей рабочих тел: передаточное отношение z варьируется в диапазоне от 1,1 до 1,9; частота вращения водила n_1 от 60 до 140 об/мин, степень заполнения C рабочими телами полости волновода от 20 до 60 %.

Разработаны эмпирические модели, позволяющие рассчитывать оптимальные технологические режимы, что минимизирует расхождения между расчетными и экспериментальными значениями параметров шероховатости (расхождение экспериментальных и расчетных значений не превышает 6 %). Установлены ключевые зависимости между технологическими режимами обработки и результатами контактного взаимодействия рабочих тел с поверхностями деталей. Проведенные исследования заложили основу технологической подготовки обработки мелкоразмерных деталей с внутренними каналами, покрытых тонким слоем серебра. Дальнейшая работа по этой теме будет направлена на изучение особенностей использования различных материалов покрытия и основного материала.

В частности, установлено, что для достижения требуемого результата обработки стальными шарами диаметром 0,2 мм необходимо поддерживать частоту вращения водила в пределах от 105 до 120 об/мин при передаточном отношении немногим более 1,5 и степени заполнения контейнера от 25 до 30 %. При этом время обработки должно находиться в пределах от 6 до 10 мин.

Таким образом, разработанный способ обработки внутренних каналов сложной формы обеспечивает повышение эффективности производственного процесса, снижает затраты на отделочные операции и гарантирует достижение требуемого качества поверхностей. Полученные результаты и предложенные методики моделирования контактного воздействия деформирующих тел малого размера на поверхность с тонкослойным покрытием и определения кинематических

характеристик деформирующих рабочих тел, перемещающихся в объеме канала под воздействием инерционных сил при центробежно-планетарном движении, могут быть использованы для технологической подготовки производства в условиях серийного и мелкосерийного машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zverovshchikov A., Zverovshchikov V., Nesterov S. Comprehensive Ensuring of Quality of Surfaces of Details at Centrifugal-Planetary Volume Processing. In: MATEC Web of Conferences. 2018;224(3):01123. URL: <https://clck.ru/3QMaJW> (дата обращения: 15.02.2025).
2. Зверовщиков В.З., Зверовщиков А.Е., Скрыбин В.А., Гурин П.А. Совершенствование центробежной отделочно-упрочняющей обработки на основе моделирования взаимодействия рабочих тел с микрорельефом поверхностей деталей. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2013;(5):34–38. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1864 (дата обращения: 17.02.2025).
3. Bersirova O.L., Kublanovskii V.S. Crystalline Roughness as a Morphological Characteristic of the Surface of Electroplated Silver Coatings. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009;82(11):1944–1948. <https://doi.org/10.1134/S1070427209100081>
4. Li Q.-X., Ma Z., Jiang B., Yao Y.-S. Edge Effect Modeling of Small Tool Polishing in Planetary Movemen. In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Shanghai; 2017;10710:1071030. <https://doi.org/10.1117/12.2317560>
5. Wang G.L., Wang Y.Q., Zhou H.B., Yan B.B. Experimental Research of the Elastic Abrasive Tool Used for Finishing Mould Surface. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;101–102:998–1001. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.101-102.998>
6. Степанов Ю.С., Афанасьев Б.И., Поляков А.И., Фомин Д.С., Кобзев Д.Л. Способ шлифования и полирования отверстий. Патент 2237567 Российская Федерация. 10 октября 2004. <https://www.elibrary.ru/ildygz>
7. Крайнов В.В., Тудакова Н.М., Фролова И.Н. Особенности применения электроплазменной обработки. *Труды Нижегородского университета им. Р. Е. Алексеева*. 2013;(5):25–30. URL: <https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva/nomera-za-2013-god> (дата обращения: 22.02.2025).
8. Бабкина Л.А., Шестаков И.Я., Квасов А.С. Численное моделирование двумерных электростатических полей при электрохимическом полировании. *Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева*. 2009;(2):9–14. URL: <https://vestnik.sibsau.ru/vestnik/924/> (дата обращения: 22.02.2025).
9. Greyson E.C., Babayan Y., Odom T.W. Directed Growth of Ordered Arrays of Small-Diameter ZnO Nanowires. *Advanced Materials*. 2004;(16):1348–1352. <https://doi.org/10.1002/adma.200400765>
10. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Мордовцев А.А., Коханюк А.Г. Исследование вибрационной обработки наружных и внутренних поверхностей деталей при их подготовке под нанесение покрытия. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021;17(1):22–26. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-1-22-26>
11. Тамаркин М.А., Смоленцев Е.В., Колганова Е.Н. Анализ современного состояния финишных методов обработки в среде свободных абразивов деталей, имеющих малые пазы и отверстия. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(1):122–129. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>
12. Kazakov K.E. Modeling of Contact Interaction for Solids with Inhomogeneous Coatings. In: Journal of Physics: Conference Series. Cambridge. 2009;181(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/181/1/012013>
13. Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu. Elastic Contact between Nominally Plane Surfaces in the Presence of Roughness and Adhesion. *Mechanics of Solids*. 2017;52(4):435–443. <https://doi.org/10.3103/S0025654417040100>
14. Nguyen N.V., Pham T.H., Kim S.E. Strain Rate-Dependent Behaviors of Mechanical Properties of Structural Steel Investigated Using Indentation and Finite Element Analysis. *Mechanics of Materials*. 2019;137:103089. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103089>
15. Chen X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Boca Raton: CRC Press; 2018. 472 p. <https://doi.org/10.1201/9781351045872>

16. Kot M., Rakowski W., Lackner J.M., Major Ł. Analysis of Spherical Indentations of Coating-Substrate Systems: Experiments and Finite Element Modeling. *Materials & Design*. 2013;43:99–111. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.040>
17. Gao C., Proudhon H., Liu M. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Shallow Indentation of Rough Strain-Hardening Surface. *Friction*. 2019;7(6):587–602. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0245-3>
18. Csanádi T., Németh D., Lofaj F. Mechanical Properties of Hard W-C Coating on Steel Substrate Deduced from Nanoindentation and Finite Element Modeling. *Experimental Mechanics*. 2017;57:1057–1069. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0190-x>
19. Alaboodi A.S., Hussain Z. Finite Element Modeling of Nano-Indentation Technique to Characterize thin Film Coatings. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2019;31(1):61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.02.001>
20. Pérez E.A.R., Souza R.M. Numerical and Experimental Analyses on the Contact Stresses Developed During Single and Successive Indentations of Coated Systems. *Surface and Coatings Technology*. 2004;188-189:572–580. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.014>
21. Zha X., Jiang F., Xu X. Investigation of Modelling and Stress Distribution of a Coating/Substrate System after an Indentation Test. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;134:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.002>
22. Pei L., Hyun S., Molinari J.F., Robbins M.O. Finite Element Modeling of Elasto-Plastic Contact between Rough Surfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005;53(11):2385–2409. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.06.008>
23. Jackson R.L., Green I. A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact Against a Rigid Flat. *Journal of Tribology*. 2005;127(2):343–354. <https://doi.org/10.1115/1.1866166>
24. Chan W.L., Fu M.W., Lu J. The Size Effect on Micro Deformation Behaviour in Micro-Scale Plastic Deformation. *Materials & Design*. 2011;32(1):198–206. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.011>
25. Kim G.Y., Ni J., Koç M. Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007;129(3):470–476. <https://doi.org/10.1115/1.2714582>
26. Tahir A., Li G.R., Liu M.J., Yang G.J., Li C.X., Wang Y.Y., и др. Improving WC-Co Coating Adhesive Strength on Rough Substrate: Finite Element Modeling and Experiment. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;37:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.033>

REFERENCES

1. Zverovshchikov A., Zverovshchikov V., Nesterov S. Comprehensive Ensuring of Quality of Surfaces of Details at Centrifugal-Planetary Volume Processing. In: MATEC Web of Conferences 2018;224(3):01123. Available at: <https://clck.ru/3QMaJW> (accessed 15.02.2025).
2. Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.E., Scryabin V.A., Gurin P.A. *Repair. Restoration. Modernization*. 2013;(5):34–38. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1864 (accessed 17.02.2025).
3. Bersirova O.L., Kublanovskii V.S. Crystalline Roughness as a Morphological Characteristic of the Surface of Electroplated Silver Coatings. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009;82(11):1944–1948. <https://doi.org/10.1134/S1070427209100081>
4. Li Q.-X., Ma Z., Jiang B., Yao Y.-S. Edge Effect Modeling of Small Tool Polishing in Planetary Movemen. In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering, Shanghai; 2017;10710:1071030. <https://doi.org/10.1117/12.2317560>
5. Wang G.L., Wang Y.Q., Zhou H.B., Yan B.B. Experimental Research of the Elastic Abrasive Tool Used for Finishing Mould Surface. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;101–102:998–1001. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.101-102.998>
6. Stepanov Ju.S., Afanasev B.I., Poljakov A.I., Fomin D.S., Kobzev D.L. Method of Grinding and Polishing Holes. Patent 2237567. Russian Federation. 2004 October 10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ildygz>
7. Krainov V.V., Tudakova N.M., Frolova I.N. Peculiarities of Employing Electric Plasma Treatment. *Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev*. 2013;(5):25–30.

- (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva/nomera-za-2013-god> (accessed 22.02.2025).
8. Babkina L.A., Shestakov I.Ya., Kvasov A.S. Numerical Modeling by Two-Dimensional Electrostatic Fields at Electrochemical Polishing. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta im. Akademika M. F. Reshetneva*. 2009;(2):9–14. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.sibsau.ru/vestnik/924/> (accessed 22.02.2025).
 9. Greyson E.C., Babayan Y., Odom T.W. Directed Growth of Ordered Arrays of Small-Diameter ZnO Nanowires. *Advanced Materials*. 2004;(16):1348–1352. <https://doi.org/10.1002/adma.200400765>
 10. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Mordovtsev A.A., Kokhanyuk A.G. Study of Vibration Treatment of External And Internal Surfaces of Parts During their Preparation for Coating. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2021;17(1):22–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-1-22-26>
 11. Tamarkin M.A., Smolentsev E.V., Kolganova E.N. Analysis of the Modern Condition of Deburring Details Having Small Grooves and Holes in the Media of Free Abrasives. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(1):122–129. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>
 12. Kazakov K.E. Modeling of Contact Interaction for Solids with Inhomogeneous Coatings. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Cambridge. 2009;181(1). P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/181/1/012013>
 13. Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu. Elastic Contact between Nominally Plane Surfaces in the Presence of Roughness and Adhesion. *Mechanics of Solids*. 2017;52(4):435–443. <https://doi.org/10.3103/S0025654417040100>
 14. Nguyen N.V., Pham T.H., Kim S.E. Strain Rate-Dependent Behaviors of Mechanical Properties of Structural Steel Investigated Using Indentation and Finite Element Analysis. *Mechanics of Materials*. 2019;137:103089. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103089>
 15. Chen X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Boca Raton: CRC Press; 2018. <https://doi.org/10.1201/9781351045872>
 16. Kot M., Rakowski W., Lackner J.M., Major Ł. Analysis of Spherical Indentations of Coating-Substrate Systems: Experiments and Finite Element Modeling. *Materials & Design*. 2013;43:99–111. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.040>
 17. Gao C., Proudhon H., Liu M. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Shallow Indentation of Rough Strain-Hardening Surface. *Friction*. 2019;7(6):587–602. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0245-3>
 18. Csanádi T., Németh D., Lofaj F. Mechanical Properties of Hard W-C Coating on Steel Substrate Deduced from Nanoindentation and Finite Element Modeling. *Experimental Mechanics*. 2017;57:1057–1069. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0190-x>
 19. Alaboodi A.S., Hussain Z. Finite Element Modeling of Nano-Indentation Technique to Characterize thin Film Coatings. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2019;31(1):61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.02.001>
 20. Pérez E.A.R., Souza R.M. Numerical and Experimental Analyses on the Contact Stresses Developed During Single and Successive Indentations of Coated Systems. *Surface and Coatings Technology*. 2004;188-189:572–580. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.014>
 21. Zha X., Jiang F., Xu X. Investigation of Modelling and Stress Distribution of a Coating/Substrate System after an Indentation Test. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;134:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.002>
 22. Pei L., Hyun S., Molinari J.F., Robbins M.O. Finite Element Modeling of Elasto-Plastic Contact between Rough Surfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005;53(11):2385–2409. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.06.008>
 23. Jackson R.L., Green I. A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact Against a Rigid Flat. *Journal of Tribology*. 2005;127(2):343–354. <https://doi.org/10.1115/1.1866166>
 24. Chan W.L., Fu M.W., Lu J. The Size Effect on Micro Deformation Behaviour in Micro-Scale Plastic Deformation. *Materials & Design*. 2011;32(1):198–206. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.011>
 25. Kim G.Y., Ni J., Koç M. Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007;129(3):470–476. <https://doi.org/10.1115/1.2714582>

26. Tahir A., Li G.R., Liu M.J., Yang G.J., Li C.X., Wang Y.Y., et al. Improving WC-Co Coating Adhesive Strength on Rough Substrate: Finite Element Modeling and Experiment. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;37:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.07.033>

Об авторах:

Зверовщиков Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7827-7462>, Researcher ID: Y-3779-2018, Scopus ID: 56891713100, SPIN-код: 9633-5769, azwer@mail.ru

Стешкин Артем Вячеславович, кандидат технических наук, заместитель главного инженера по развитию предприятия Федерального научно-производственного центра «Производственное объединение “Старт” им. М. В. Проценко» (442960, Российская Федерация, г. Заречный, пр-т Мира, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8850-7702>, asteshkin58@gmail.com

Гурин Павел Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6045-5432>, SPIN-код: 3236-4508, sbgurin_pavel@list.ru

Миронычев Николай Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4393-9523>, Researcher ID: P-7228-2015, Scopus ID: 58074735200, minial@bk.ru

Зотов Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9110-3995>, Researcher ID: GRX-2733-2022, SPIN-код: 8694-6570, zotovpvgu@gmail.com

Скрябин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудование машиностроения Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, Researcher ID: R-2385-2018, Scopus ID: 6603685168, vs_51@list.ru

Вклад авторов:

А. Е. Зверовщиков – формулировка замысла/идеи исследования, целей и задач; контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

А. В. Стешкин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств; предоставление доступа к необходимым для исследования материалам.

П. А. Гурин – разработка методологии исследования, создание моделей; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Н. А. Миронычев – применение статистических, математических, вычислительных методов для анализа для анализа данных исследования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Е. В. Зотов – создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 18.02.2025; поступила после рецензирования 13.08.2025;
принята к публикации 09.10.2025*

Authors the contribution:

Alexandr E. Zverovshchikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7827-7462>, Researcher ID: Y-3779-2018, Scopus ID: 56891713100, SPIN-code: 9633-5769, azwer@mail.ru

Artem V. Steshkin, Cand.Sci. (Eng.), Deputy Chief Engineer for Enterprise Development, Production Association “Start” named after M. V. Protsenko (1 Mira Ave., Zarechny 442960, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8850-7702>, asteshkin58@gmail.com

Pavel A. Gurin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6045-5432>, SPIN-code: 3236-4508, sbgurin_pavel@list.ru

Nikolay A. Mironychev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4393-9523>, Researcher ID: P-7228-2015, Scopus ID: 58074735200, minial@bk.ru

Evgenii V. Zotov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9110-3995>, Researcher ID: GRX-2733-2022, SPIN-code: 8694-6570, zotovpgu@gmail.com

Vladimir A. Skryabin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198>, Researcher ID: R-2385-2018, Scopus ID: 6603685168, vs_51@list.ru

Authors contribution:

A. E. Zverovshchikov – formulating the study plan/idea, aim and objectives; control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study.

A. V. Steshkin – conducting the study process, including conducting experiments or collecting data/evidence; providing access to materials necessary for research.

P. A. Gurin – developing the study methodology, creating models; testing reproducibility of experimental and study results within the framework of the main or additional tasks of the study; preparing the manuscript: visualizing the study results and data obtained.

N. A. Mironychev – using statistical, mathematical, computational methods for analyzing the study data; preparing the manuscript: visualizing the study results and data obtained.

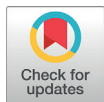
E. V. Zotov – preparing the manuscript: writing the manuscript draft, including its translation into a foreign language.

V. A. Skryabin – preparing the manuscript: critical analysis of the manuscript draft, making comments and corrections by members of the research group, including at the stages before and after publication.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 18.02.2025; revised 13.08.2025; accepted 09.10.2025

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.641-657>

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

УДК / UDK 631.362.3

Оригинальная статья / Original article

Экспериментальное исследование процесса предварительного выделения легких компонентов очесанного вороха

В. Ю. Савин¹✉, В. Н. Ожерельев²,
В. В. Никитин², И. П. Адылин²

¹Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация

²Брянский государственный аграрный университет,
с. Кокино, Российская Федерация

✉ savinvu@bmstu.ru

Аннотация

Введение. Повышение производительности зерноуборочного комбайна при сохранении его приемлемой металло- и энергоемкости представляет собой одну из ключевых проблем в области развития зерноуборочной техники. Традиционные решения малоэффективны, поэтому одним из перспективных направлений является использование технологии очеса растений на корню.

Цель исследования. Определить долю выделенных легких компонентов вороха в зависимости от высоты выходного канала очесывающей жатки.

Материалы и методы. При исследовании очесывающей жатки с предварительным выделением мелкого вороха использован экспериментальный метод. В ходе эксперимента варьировалась высота выходного канала очесывающей жатки. Определены масса выделенного вороха и его состав. В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости, соответствующие цели исследования. Эксперимент проводился при разных условиях: с установленными сплошными щитками на задней стенке очесывающего устройства и без сплошных щитков, когда задняя стенка представляет собой сетчатую поверхность.

Результаты исследования. Разработана методика определения доли выделенных легких частиц. Получены зависимости доли выделенных легких компонентов и доли вынесенного зерна от высоты выходного канала. Определена зона оптимальных значений высоты выходного канала при демонтированных закрытых щитках на задней стенке очесывающего устройства. В диапазоне высоты выходного канала от 124 до 130 мм доля выделенных легких компонентов достигает 13 % при том, что потери зерна остаются на достаточно небольшом уровне.

Обсуждение и заключения. В рамках выделения легких компонентов вороха получен значимый результат, позволяющий не только разгрузить систему очистки зерноуборочного комбайна и повысить ее производительность, но и улучшить

© Савин В. Ю., Ожерельев В. Н., Никитин В. В., Адылин И. П., 2025



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

эффективность выделения свободного зерна на предбарабанном сепарирующем устройстве либо непосредственно на решетчатом днище наклонной камеры.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, очесывающий адаптер, очесывающий барабан, очесанный ворох, сепарация легких примесей

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Савин В.Ю., Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Адылин И.П. Экспериментальное исследование процесса предварительного выделения легких компонентов очесанного вороха. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):641–657. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.641-657>

Experimental Study of the Process of Preliminary Separation of Light Impurities from Combed Heap

V. Yu. Savin^a ✉, V. N. Ozherelev^b, V. V. Nikitin^b, I. P. Adylin^b

^a *Bauman Moscow State Technical University,*

Moscow, Russian Federation

^b *Bryansk State Agrarian University,*

Kokino, Russian Federation

✉ savinvu@bmstu.ru

Abstract

Introduction. There are specified and considered the trends determining the directions for the development of grain harvesting equipment. One of the most important issues is increasing the productivity of a grain harvester while maintaining its acceptable metal content and energy consumption. Traditional solutions have largely exhausted themselves, so a promising solution is the use of the technology for combing of standing plants.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the proportion of light impurities separated from the grain heap depending on the height of the combing header outlet.

Materials and Methods. There was used an experimental method to examine a combing header with preliminary separation of light impurities. During the experiment, the height of the stripper header outlet was varied. The mass of the separated chaff and its composition were determined. When processing the experimental data, there were obtained relationships meeting the study objectives. The results are divided into two groups: the results with the use of solid shields installed on the combing header rear wall and those without solid shields, when the rear wall is a mesh surface.

Results. There has been developed a method for determining the proportion of separated light impurities. There have been found the dependences of the proportion of separated light impurities and the proportion of lost grain on the combing header outlet height. There has been identified an optimal range of the combing header outlet height if the solid shields removed from the combing header rear wall. If the range of combing header outlet height is from 124 to 130 mm, the proportion of separated light impurities reaches 13%, while grain losses remain relatively low.

Discussion and Conclusion. In the context of separating the heap light impurities, there has been obtained a significant result, which allows not only unloading significantly the grain harvester cleaning system and increasing its productivity, but also improving the efficiency of separating grain on the pre-drum separating device or directly on the grate bottom of the inclined chamber.

Keywords: combine harvester, combing header, rotary comb-dresser, combed heap, separation of light impurities

Acknowledgements: The authors express their gratitude to anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

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

For citation: Savin V.Yu., Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Adylin I.P. Experimental Study of the Process of Preliminary Separation of Light Impurities from Combed Heap. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):641–657. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.641-657>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие зерноуборочной техники связано с решением ключевых задач, среди которых повышение производительности [1; 2], сокращение потерь и повреждений зерна, а также снижение металлоемкости машин и энергоемкости технологического процесса [3–5].

Важным аспектом, определяющим направления развития зернового хозяйства, является увеличение урожайности зерновых культур [6–8]. Исследования самарских ученых показали, что использование инновационной технологии внесения карбамидно-аммиачной смеси с добавлением микроэлемента серы позволило улучшить показатели урожайности озимой пшеницы сорта Базис до 51,8 % [9].

Зарубежные исследователи в качестве значимого фактора указывают нехватку рабочей силы в сельскохозяйственной отрасли [10–12].

Работа зерноуборочного комбайна традиционной компоновки на верхней границе рабочей скорости часто приводит к перегрузке системы очистки и, следовательно, к повышению потерь зерна [13].

Указанные тенденции, а также недостаточное количество зерноуборочной техники в нашей стране [14–16] ставят на первый план проблему повышения производительности зерноуборочного комбайна при сохранении его приемлемой металло- и энергоемкости. Традиционные решения не всегда эффективны. Так, при увеличении ширины молотильного аппарата непропорционально возрастает масса комбайна. Двухбарабанные системы обмолота имеют высокую металло- и энергоемкость. Использование барабана-ускорителя сопряжено с риском повышения травмирования зерна.

Одним из перспективных решений является применение технологии очеса растений на корню, реализация которой возможна как на новых зерноуборочных машинах, так и на уже существующем парке комбайнов. Модернизация существующих комбайнов позволяет перевести их на новый уровень производительности. Кроме этого, уборка методом очеса способствует восстановлению почвенного плодородия и улучшению процессов влагозадержания в почве [17; 18].

Использование жатки очесывающего типа на зерноуборочном комбайне не в полной мере позволяет раскрыть все преимущества технологии очеса растений. Наличие значительного количества свободного зерна и мелкого вороха, полученных в процессе очеса, может приводить к некоторым негативным последствиям:

направляемое в молотильный аппарат свободное зерно подвергается избыточному механическому воздействию, вследствие чего увеличивается его травмирование и растут энергозатраты. Производительность системы очистки зерноуборочного комбайна зависит от поступающего на нее объема мелкого вороха, образующегося при работе очесывающего устройства. Таким образом, первоочередными становятся следующие задачи: предварительное выделение из очесанного вороха свободного зерна и направление его на очистку, минуя молотильное устройство, с одновременным удалением из него как можно большей части мелкой фракции.

Гипотеза исследования заключается в том, что предварительное удаление максимально возможной доли мелкой фракции вороха способствует увеличению скорости сепарации свободного зерна за счет снижения забиваемости решетчатых поверхностей и уменьшения общего объема обрабатываемого материала. Выявлена вторая причина для предварительного удаления из очесанного вороха мелких примесей, поскольку уменьшение в нем массовой доли свободного зерна снижает проход последнего сквозь отверстия решетчатой поверхности на 15 %. Следовательно, положительный эффект от уменьшения содержания в ворохе легкой фракции отчасти проявляется еще до его поступления в систему очистки комбайна.

Цель исследования – определение влияния высоты выходного канала очесывающей жатки на эффективность выделения легких компонентов (половы) из очесанного вороха и на величину потерь зерна.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) адаптировать конструктивную схему лабораторной установки к конструкции жатки «Озон»;
- 2) оценить долю выделенного мелкого вороха при различных регулировочных параметрах оборудования;
- 3) выявить долю свободного зерна, выносимого из корпуса жатки вместе с мелким ворохом.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Свободное зерно и мелкие фракции обладают разными физико-механическими свойствами, поэтому удалять их из очесанного вороха следует посредством двух различных технологических процессов. Зерно остается в технологическом потоке комбайна, а мелкие фракции вороха должны быть выведены во внешнюю среду. Проанализируем возможные варианты конструктивного исполнения предложенной технологической идеи.

Систематизация конструкций сепарирующих устройств, позволяющих произвести предварительное выделение свободного зерна до попадания очесанной массы в молотильное устройство, а также теоретическое обоснование процесса представлены учеными из Брянского государственного аграрного университета [19; 20]. Ими выделены две группы технических решений: сепарация происходит внутри наклонной камеры, сепарирующие органы расположены перед молотильным аппаратом. Наиболее предпочтительным решением является использование в качестве основного элемента сепарирующей системы решетчатого

днища наклонной камеры комбайна, что обусловлено прежде всего отсутствием необходимости перекомпоновки комбайна и возможностью унификации деталей и узлов.

Также проведен анализ влияния угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха [21]. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований, проведенных на установке, созданной на основе колосового элеватора зерноуборочного комбайна, снабженного набором сменных экспериментальных решет. В связи с этим установлено, что максимальная пропускная способность устройства соответствует горизонтальному положению решетчатого днища и отверстиям шириной 12 мм. Предложены компоновочные решения по установке сепарирующего устройства на зерноуборочный комбайн.

Концепция предварительного отделения легких примесей представлена в авторском свидетельстве специалистов Мелитопольского института сельского хозяйства¹. Для предварительного частичного вывода легких примесей можно использовать установленную в задней части очесывающего устройства сетчатую поверхность. При этом данная концепция не лишена недостатков: сетчатая поверхность подвержена забиванию, а увеличение крупности сетки приведет к потерям зерна.

Конструкция очесывающей жатки с предварительным отделением легких примесей предложена брянскими учеными [22]. Для этого предполагается использовать жалюзийную решетку, установленную на задней стенке очесывающего адаптера. Данная решетка образована продольными пластинами криволинейной формы, сориентированными вогнутостью в сторону задней стенки адаптера. Воздушный поток, проходя через отверстия жалюзийной решетки, должен менять направление и выносить легкие примеси наружу из корпуса адаптера.

Представлены результаты экспериментальных исследований по отделению легких примесей, произведенных с использованием модели пневмоочистительного устройства, имитирующего процесс движения воздуха и очесанного вороха внутри корпуса адаптера [23]. Установлено, что удаление из очесанного вороха большей части легких компонентов возможно без потери зерна. Выявлены оптимальные диапазоны варьирования факторов, определяющих процесс сепарации. Оптимальная скорость воздушного потока на выходе из выгрузного патрубка составила 6...6,5 м/с.

Возможны два варианта удаления мелкой фракции вороха непосредственно из корпуса очесывающего адаптера. В первом случае процесс предполагается осуществлять посредством жалюзийной решетки, во втором – за счет перепада скоростей воздушного потока вследствие резкого изменения поперечного сечения воздушных каналов [22; 23]. Второй вариант конструкции показал свою работоспособность при его испытании в виде лабораторной модели, выполненной в масштабе 1:4.

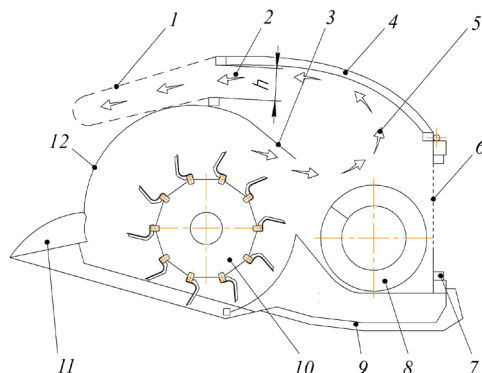
¹ Голубев И.К., Кончаров Б.И. Устройство для обмолота сельскохозяйственных культур на корню. Патент 1547758 СССР. 7 марта 1990. URL: <https://patents.su/2-1547758-ustrojstvo-dlya-obmolota-selskokhozyajstvennykh-kultur-na-kornyu.html> (дата обращения: 23.02.2025).

В рамках данного исследования решена задача по определению взаимосвязей ключевых параметров: высоты выходного канала очесывающей жатки с одной стороны, и долей легких компонентов вороха и вынесенного зерна — с другой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы, оборудование и процедура исследования

Очесывающая жатка «Озон» была соответствующим образом модернизирована для достижения цели исследования (рис. 1). У одной из трех ее секций сетчатая стенка 6 была заменена на сплошную. При этом между обтекатель 12 и крышкой 4 осталась продольная щель для выхода воздуха и захваченного им мелкого вороха, ширина которой h могла регулироваться посредством цилиндрических шарниров крепления крышек 4 к корпусу 7 и кронштейнов с отверстиями. Для улавливания мелкого вороха по контуру щели закрепляли мягкий сетчатый контейнер (мешок) 1. Генерируемый очесывающим рабочим органом 10 воздушный поток, миновав внутренний щиток 3 над шнеком 8, оказался в радикально расширившемся воздушном канале, вследствие чего потерял скорость и тяжелые компоненты, в том числе свободное зерно, которое шнек 8 подавал в наклонную камеру вместе с недомолоченными колосьями и кусками соломы. Задняя стенка корпуса жатки комбинированная. Часть ее поверхности затянута сеткой 6, которая может быть перекрыта сплошным щитком. Таким образом, параметры воздушного потока можно дополнительно регулировать.



Р и с. 1. Схема экспериментальной очесывающей жатки с предварительным выделением мелкого вороха:

- 1 – мягкий сетчатый контейнер (мешок); 2 – выходной воздушный канал;
3 – внутренний щиток; 4 – крышка; 5 – легкие примеси; 6 – задняя сетчатая стенка;
7 – корпус; 8 – шнек; 9 – лыжа; 10 – очесывающий рабочий орган;
11 – отсекающий щиток; 12 – обтекатель

F i g. 1. The scheme of an experimental combing header with preliminary separation of light impurities:

- 1 – mesh bag; 2 – air outlet duct; 3 – inner shield; 4 – cover; 5 – light impurities;
6 – rear mesh wall; 7 – frame; 8 – screw; 9 – ski; 10 – combing drum;
11 – baffle; 12 – fairing

Примечание: h – высота выходного окна.

Note: h – height of the outlet channel.

Источник: рисунки 1, 4, 5 составлены авторами статьи.

Source: figures 1, 4, 5 are compiled by the authors of the article.

Экспериментальная очесывающая жатка агрегатировалась с комбайном СК-5МЭ-1 «НИВА-ЭФФЕКТ» (рис. 2). Испытания проводились на полях учебно-опытного хозяйства Брянского государственного аграрного университета при уборке пшеницы сорта Злата. Пшеница данного сорта относится к мягким яровым среднеранним пшеницам [24]. Условия уборки – типичные для Центрально-Нечерноземной зоны. Средняя высота стеблестоя составила 91 см. Влажность зерна была на уровне 20,5 %. Урожайность пшеницы – 32 ц/га.



Р и с. 2. Экспериментальная очесывающая жатка

F i g. 2. Experimental combing header

Источник: фотография сделана В. Ю. Савиным на территории Брянского государственного аграрного университета (09.08.2024 г.).

Source: photo are taken by V. Yu. Savin on the territory Bryansk State Agrarian University on 09 August 2024.

Площадь поперечного сечения выходного воздушного канала регулировалась. Для этого были изготовлены кронштейны (рис. 3), в которых с одинаковым шагом просверлены крепежные отверстия. Высота поперечного сечения выходного канала устанавливалась посредством фиксации держателя крышки в соответствующем отверстии кронштейна.

Для приема выделенного очесанного вороха изготовлена и смонтирована система его улавливания, состоящая из мягкого сетчатого контейнера (мешка), крепежной пластины и уголка. Сетчатый контейнер (мешок) изготовлен из прочного стекловолоконного материала. Величина отверстий в сетке порядка 1 мм, что исключало потерю как свободного зерна, так и других компонентов вороха. Боковины основного воздушного канала были закрыты плотной полипропиленовой тканью.

Программа экспериментальных исследований предусматривала установление зависимости состава и массы выделенного вороха от высоты выходного воздушного канала, а также определение потерь зерна, обусловленных возможным выбросом части зерна за пределы жатки через выходной воздушный канал.



Р и с. 3. Кронштейн для крепления и регулировки положения верхней крышки
F i g. 3. Bracket for fixing and adjusting the position of the top cover

Источник: фотография сделана В. Ю. Савиным на территории Брянского государственного аграрного университета (09.08.2024 г.).

Source: photo are taken by V. Yu. Savin on the territory Bryansk State Agrarian University on 09 August 2024.

На этапе, предшествующем планированию эксперимента, выполнены установочные опыты, позволившие выявить влияние скорости движения зерноуборочного комбайна на состав и массу выделенного вороха.

Методика проведения эксперимента предусматривала следующую последовательность операций: предварительную общую регулировку зерноуборочного комбайна и очесывающей жатки, регулировку контролируемых параметров, контрольный проход комбайна, сбор выделенной очесанной массы и ее сортировка, взвешивание фракций, обработку полученных результатов.

В рамках предварительной настройки техники были отрегулированы положение обтекателя относительно стеблестоя и частота вращения очесывающего рабочего органа (барабана). Во всех опытах обтекатель установлен в крайнее нижнее положение. Частота вращения очесывающего барабана составляла 580 об/мин и регулировалась переключением передачи редуктора адаптера.

Перед каждым контрольным проходом высота выходного канала регулировалась поворотом крышки и фиксировалась специальными кронштейнами, расположенными по обе стороны от нее. Экспериментальные исследования проводили, устанавливая верхнюю крышку в три положения, которым соответствуют значения высоты выходного канала, равные 88, 124 и 160 мм.

Длина учетной делянки определялась рулеткой. Во время испытаний контролировалось соблюдение рабочей скорости комбайна, равной 8 км/ч.

Очесанную массу собирали после каждого прохода путем отсоединения сетчатого мешка от корпуса жатки и перемещения его содержимого в емкость, отдельную для каждого варианта опыта.

Полученную таким образом массу сортировали в лаборатории с разделением на две фракции: мелкие примеси и свободное зерно. Сортировка и разделение выполнялись вручную на специальном столе. В очесанных колосьях, попавших в сетчатый мешок, зерна не обнаружено. Для измерения массы выделенных компонентов использовались весы лабораторные с дискретностью 0,1 г.

Эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе задняя стенка адаптера была оборудована стандартными сетчатыми панелями (окнами), которые в обычном исполнении жатки являются элементами воздушного канала, необходимого для обеспечения направленности и вывода образующегося воздушного потока.

Второй этап предусматривал закрытие сетчатых окон сплошными панелями. Предполагалось, что закрытие заводской конструкцией сетчатого окна для выхода через него воздушного потока перенаправит последний в выходной канал 2 (рис. 1). Вследствие этого повысится расход воздуха и скорость воздушного потока в выходном канале, что приведет к увеличению вывода половины из корпуса очесывающего адаптера. Также необходимо учесть, что при приближении скорости воздушного потока к значениям, близким к скорости витания зерна [25; 26], существует вероятность увеличения его потерь, связанная с выбросом части зерновок вместе с мелким ворохом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приведены результаты эксперимента, сгруппированные по типу задней стенки: со сплошными щитками и с сетчатой поверхностью.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Массы выделенных легких компонентов вороха и вынесенного зерна
Weight of separated light impurities and carried-out grain

Высота выходного окна h , мм / Height of the outlet channel h , mm	Масса легких компонентов вороха, г / Weight of light impurities, g	Масса зерна, г / Grain weight, g
<i>Со щитками / With shields</i>		
88	136	13
124	129	18
160	251	22
<i>Без щитков / Without shields</i>		
124	182	15
160	318	27

В рамках статистической обработки результатов эксперимента была проведена проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена². Дисперсии признаны однородными.

В первую очередь, необходимо определить доли выделенной половины и вынесенного зерна, чтобы выполнить общий анализ результатов опытов.

² Рогов В.А., Позняк Г.Г. Методика и практика технических экспериментов. М.: Издательский центр «Академия»; 2005. 288 с.

Для определения доли выделенных легких компонентов вороха μ использовано следующее выражение:

$$\mu = \frac{W_1}{W} \cdot 100 \%,$$

где W – общая масса легких компонентов во всем объеме очесанного вороха, полученного за проход комбайна, г; W_1 – масса легких компонентов, выделенных за проход комбайна в процессе предварительной сепарации очесанного вороха, г. Общую массу легких компонентов вороха W определяли следующим образом:

$$W = 1000M \cdot \frac{\delta}{100} = 10M\delta,$$

где M – общая масса зерносоломистого вороха, полученного за проход в процессе очеса, кг; δ – среднее содержание легких компонентов в очесанном ворохе, %.

Проанализировав результаты исследований по установлению содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы [27], приняли значение содержания легких компонентов в очесанном ворохе при обработке результатов экспериментальных исследований $\delta = 10 \%$.

Общая масса M зерносоломистого вороха, убранный за проход, составила:

$$M = 100Y(1 + k_c)S,$$

где Y – урожайность пшеницы, ц/га; S – площадь делянки, убранной за один прогон, га; k_c – коэффициент, учитывающий соотношение массы зерна и солоmistых частиц в очесанном ворохе. При соотношении массы зерна M_z и солоmistых частиц M_c в очесанном ворохе 1:0,3 [28], коэффициент составил $k_c = 0,3$.

Для определения доли вынесенного зерна использовано выражение:

$$\gamma = \frac{Q_1}{Y \cdot S \cdot 10^5} \cdot 100 \%,$$

где Q_1 – масса вынесенного зерна, г. Результаты обработки экспериментальных данных по определению доли выделенных легких компонентов в зависимости от высоты выходного канала представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

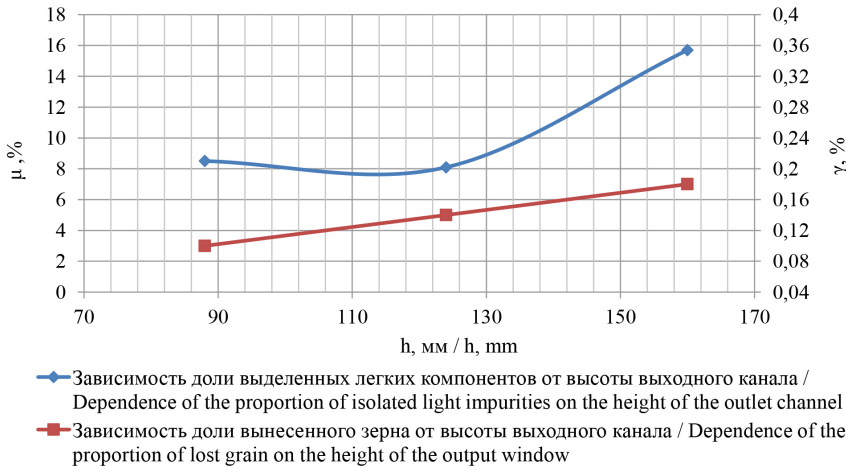
T a b l e 2

Доли выделенных легких компонентов и потери зерна
The proportion of separated light impurities and grain losses

Высота выходного окна h , мм / Height of the outlet channel h , mm	Доля выделенных легких компонентов вороха, μ , % / Proportion of isolated light impurities, μ , %	Доля вынесенного зерна γ , % / Proportion of lost grain γ , %
<i>Со щитками / With shields</i>		
88	8,5	0,10
124	8,1	0,14
160	15,7	0,18
<i>Без щитков / Without shields</i>		
124	11,4	0,12
160	19,9	0,22

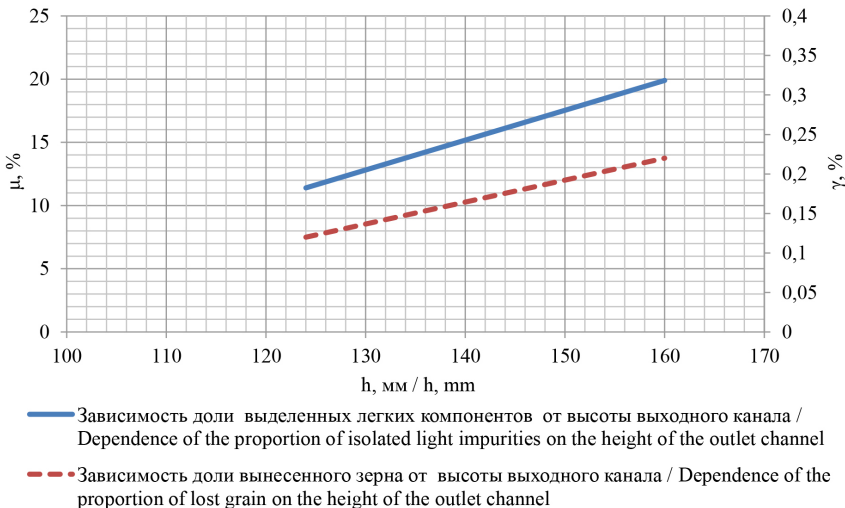
Графическая зависимость доли выделенных легких компонентов от высоты выходного канала при закрытых щитках сетчатых окнах представлена на рисунке 4. Здесь же нанесена кривая зависимости доли вынесенного зерна γ от высоты выходного канала h .

Аналогичные графические зависимости, но при проведении экспериментальных исследований при открытых сетчатых окнах (при демонтированных сплошных щитках), показаны на рисунке 5.



Р и с. 4. Результаты экспериментальных исследований, полученные при закрытии сетчатых окон в корпусе адаптера сплошными щитками

F i g. 4. Results of experimental studies obtained by closing the mesh windows in the adapter body with solid shields



Р и с. 5. Результаты экспериментальных исследований, полученные при демонтаже щитков, закрывающих сетчатые окна в корпусе адаптера

F i g. 5. Results of experimental studies obtained if removed the shields covering mesh windows in the adapter case

Представленные на рисунках 4, 5 совмещенные графики позволяют выделить рабочие диапазоны высоты выходного воздушного канала при открытых сетчатых окнах и в случае их закрытия сплошными щитками.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью исследований определены доли выделенных легких компонентов вороха относительно высоты выходного канала очесывающей жатки.

Анализируя результаты, полученные при закрытии сетчатых окон, целесообразно выделить значение высоты выходного канала $h = 88$ мм. Данному размеру соответствуют минимальные потери зерна $\gamma = 0,1$ % и доля выделенных компонентов мелкого вороха, равная $\mu = 8,5$ %. Увеличение высоты выходного канала до 160 мм приводит к значительному повышению доли выделенных легких компонентов (до 16 %), при этом заметно растут и потери зерна.

В случае использования открытых сетчатых окон в задней стенке корпуса адаптера картина процесса существенно различается. В диапазоне высоты выходного воздушного канала от 124 до 130 мм доля выделенных легких компонентов достигает 13 % при том, что потери зерна остаются на достаточно небольшом уровне (до 0,13 %). Это объясняется уменьшением расхода и скорости воздуха в выходном воздушном канале вследствие открытия дополнительного канала выхода воздушного потока через сетчатые окна задней стенки корпуса адаптера.

Доля выделенных легких компонентов равная 13 % – это значимый результат, позволяющий повысить производительность и заметно разгрузить систему очистки зерноуборочного комбайна, что в итоге приведет к повышению производительности зерноуборочного комбайна с очесывающей жаткой. Кроме того, удаление части легких компонентов вороха позволит улучшить эффективность выделения свободного зерна на предбарабанном сепарирующем устройстве либо непосредственно на решетчатом днище наклонной камеры.

В рамках дальнейшего развития рассмотренной темы целесообразно выявить и испытать дополнительные конструктивные элементы (решения), препятствующие процессу выноса воздушным потоком части свободного зерна, доля которого не велика, и для ее дальнейшего радикального уменьшения имеются резервы. Это позволит ориентироваться на предварительное выделение в корпусе адаптера до 20 % легких примесей при исчезающе малом количестве вынесенного воздушным потоком зерна, практически не оказывающим влияние на его общие потери за комбайном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чепик Д.А., Колесников А.В. Проблемы материально-технического обеспечения растениеводства. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2022;(4):24–31. <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-4-24-31>
2. Сорокина Т.И. Анализ состояния и пути совершенствования использования тракторного парка, зерноуборочной и кормоуборочной техники агропредприятия. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022;(3):170–176. URL: <https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia95.pdf> (дата обращения: 22.02.2025).
3. Tomchuk V. Loss Management When Harvesting Grain, Legume and Oilseed Crops. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020;50(1):54–67. <https://elibrary.ru/vaqqxe>

4. Mladin F., Văcărescu G., Duma Copcea A., Mihuțstudies C. On the Harvesting of Grassy Cereals Within the S.C. Farm. Andreas Agro Brikets S.R.L. from the Town of Bobda, Timiș County. *Research Journal of Agricultural Science*. 2023;55(4):114–120. URL: https://www.rjas.ro/paper_detail/3750 (дата обращения: 21.02.2025).
5. Xu L., Li Y., Li Y., Chai X., Qiu J. Research Progress on Cleaning Technology and Device of Grain Combine Harvester. *Nongye Jixie Xuebao Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2019;50(10):1–16. URL: <http://nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/880> (дата обращения: 21.02.2025).
6. Пашканг Н.Н., Мартынушкин А.Б., Романова Л.В., Стоян М.В. Состояние зернового хозяйства в Рязанской области: основные проблемы и пути их решения. *Социально-экономический и гуманитарный журнал*. 2022;(2):35–50. <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2022-2-35-50>
7. Сорокин И.А., Некипелов Р.Е. Оценка возможности модернизации сельскохозяйственной техники путем отслеживания качества процесса сбора урожая зерновых культур. *Вестник НГИЭИ*. 2024;(7):41–56. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2321 (дата обращения: 21.02.2025).
8. Guarin J.R., Martre P., Ewert F., Webber H., Dueri S., Calderini D., и др. Evidence for Increasing Global Wheat Yield Potential. *Environmental Research Letters* 2022;17:124045. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca77c>
9. Милюткин В.А., Овчинников В.А. Повышение урожайности и качества зерна озимой пшеницы за счет применения инновационных удобрений и сельхозмашин. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(1):52–67. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>
10. Hossain M.A., Hoque M.A., Wohab M.A., Miah M.A.M., Hassan M.S. Technical and Economic Performance of Combined Harvester in Farmers Field. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*. 2015;40(2):291–304. <https://doi.org/10.3329/bjar.v40i2.24569>
11. Esgici R., Sessiz A., Bayhan Y. The Relationship between the Age of Combine Harvester and Grain Losses for Paddy. *International Scientific Journals*. 2016;62(1):18–21. URL: <https://stumejournals.com/journals/am/2016/1/18> (дата обращения: 21.02.2025).
12. Zhang Z., Noguchi N., Ishii K., Yang L., Zhang C. Development of a Robot Combine Harvester for Wheat and Paddy Harvesting. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46(4):45–48. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00013>
13. Tihanov G., Dalle M., Hristova G., Mitkov I. Loss of Grain at Harvesting Wheat with a Combine Harvester. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2021;64(1):577–582. URL: https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2021/issue_1/Art76.pdf (дата обращения: 22.02.2025).
14. Зюкин Д.А., Петрушина О.В., Глушков И.А., Руденко С.Р. Снижение технической оснащенности как угроза роста потерь и снижения эффективности в зерновом подкомплексе АПК. *Вестник НГИЭИ*. 2024;(8):84–95. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2326 (дата обращения: 22.02.2025).
15. Хафизов Д.Ф., Валиев А.Р., Мухаметгалиев Ф.Н., Хисматуллин М.М., Мингазов А.И. Развитие материально-технической базы агропромышленного комплекса в условиях внешне-экономических санкций. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2023;18(4):170–177. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-170-177>
16. Шамин А.Е., Заикин В.П., Лисина А.Ю. Производство зерна в России: достижения, существующие и возможные проблемы. *Вестник НГИЭИ*. 2022;(3):110–121. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-3-110-121>
17. Naorem A., Jayaraman S., Dang Y.P., Dalal R.C., Rao C.S., Patra A.K. Soil Constraints in an Arid Environment – Challenges, Prospects, and Implications. *Agronomy*. 2023;13(1):220. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010220>
18. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalsiy I.A. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46–51. URL: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (дата обращения: 22.02.2025).

19. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Сопоставление эффективности различных типов сепарирующих устройств при очесе зерна на корню. *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2024;(1):176–182. <https://elibrary.ru/uxuoxf>
20. Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Комогорцев В.Ф., Синяя Н.В. К обоснованию способа предварительной сепарации свободного зерна при очесе растений на корню. *Наука в центральной России*. 2023;61(1):77–84. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-77-84>
21. Никитин В.В., Ожерельев В.Н. Влияние угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(1):26–43. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.026-043>
22. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Устройство для обмолота растений на корню. Патент 2566017 Российская Федерация. 20 октября 2015. <https://elibrary.ru/zftmnn>
23. Савин В.Ю., Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Отделение легких примесей из очесанного вороха в корпусе адаптера. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(3):370–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.370-387>
24. Никифоров В.М., Никифоров М.И., Мамеев В.В. Урожайность и качество зерна сортов яровой пшеницы в условиях Брянской области. *Вестник Брянской ГСХА*. 2020;(1):7–12. URL: https://www.bgsha.com/download/education/library/v1_20.pdf (дата обращения: 22.02.2025).
25. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Результаты исследований аэродинамических свойств зерновых материалов. *Наука в центральной России*. 2023;61(1):100–107. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-100-107>
26. Анисимов А.В. Результаты экспериментального определения физико-механических свойств материалов, обрабатываемых в шелушильной машине. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020;(4):156–160. URL: https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_84.pdf (дата обращения: 22.02.2025).
27. Леженкин И.А. Статистическая модель содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы. *Вісник Харківського Національного Технічного Університету Сільськогосподарства Імені Петра Василенка*. 2013;132:355–360. URL: <https://repo.btu.kharkiv.ua/items/75d61cb3-1909-4cbc-bea0-dd6b86cfd9c2> (дата обращения: 27.02.2025).
28. Бурьянов А.И., Пасечный Н.И. Обоснование класса комбайна для уборки зерновых методом очеса. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2004;(4):21–23. <https://www.elibrary.ru/rwamif>

REFERENCES

1. Chepik D.A., Kolesnikov A.V. Problems of Logistic and Technical Support of Plant Production. *Legumes and Groat Crops*. 2022;(4):24–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-4-24-31>
2. Sorokina T.I. Analysis of the State And Ways to Improve the Use of the Tractor Fleet, Grain Harvesting and Fodder Harvesting Equipment of the Agricultural Enterprise. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022;(3):170–176. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia95.pdf> (accessed 21.02.2025).
3. Tomchuk V. Loss Management When Harvesting Grain, Legume and Oilseed Crops. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020; 50(1):54–67. <https://elibrary.ru/vaqqxe>
4. Mladin F., Văcărescu G., Duma Copcea A., Mihutstudies C. On the Harvesting of Grassy Cereals Within the S.C. Farm. Andreas Agro Brikets S.R.L. from the Town of Bobda, Timiș County. *Research Journal of Agricultural Science*. 2023;55(4):114–120. Available at: https://www.rjas.ro/paper_detail/3750 (accessed 21.02.2025).
5. Xu L., Li Y., Li Y., Chai X., Qiu J. Research Progress on Cleaning Technology and Device of Grain Combine Harvester. *Nongye Jixie Xuebao Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2019;50(10):1–16. Available at: <http://nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/880> (accessed 21.02.2025).

6. Pashkang N.N., Martynushkin A.B., Romanova L.V., Stoyan M.V. Grain Farming State in the Ryazan Region: Main Problems and Ways to Solve Them. *The Social and Economic and Humanitarian Magazine*. 2022;(2):35–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2022-2-35-50>
7. Sorokin I.A., Nekipelov R.E. Modernization of the Agricultural System for Monitoring the Quality of the Grain Harvesting Process. *Bulletin NGIEI*. 2024;(7):41–56. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2321 (accessed 21.02.2025).
8. Guarin J.R., Martre P., Ewert F., Webber H., Dueri S., Calderini D., et al. Evidence for Increasing Global Wheat Yield Potential. *Environmental Research Letters* 2022;(17):124045. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca77c>
9. Milyutkin V.A., Ovchinnikov V.A. Increasing the Yield and Quality of Winter Wheat Grain through the Use of Innovative Fertilizers and Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):52–67. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>
10. Hossain M.A., Hoque M.A., Wohab M.A., Miah M.A.M., Hassan M.S. Technical and Economic Performance of Combined Harvester in Farmers Field. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*. 2015;40(2):291–304. <https://doi.org/10.3329/bjar.v40i2.24569>
11. Esgici R., Sessiz A., Bayhan Y. The Relationship between the Age of Combine Harvester and Grain Losses for Paddy. *International Scientific Journals*. 2016;62(1):18–21. Available at: <https://stume-journals.com/journals/am/2016/1/18> (accessed 21.02.2025).
12. Zhang Z., Noguchi N., Ishii K., Yang L., Zhang C. Development of a Robot Combine Harvester for Wheat and Paddy Harvesting. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46(4):45–48. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00013>
13. Tihanov G., Dalle M., Hristova G., Mitkov I. Loss of Grain at Harvesting Wheat with a Combine Harvester. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2021;64(1):577–582. Available at: https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2021/issue_1/Art76.pdf (accessed 22.02.2025).
14. Zyukin D.A., Petrushina O.V., Glushkov I.A., Rudenko S.R. Reduction of Technical Equipment as a Threat of Increased Losses and Reduced Efficiency in the Grain Subcomplex of the Agro-Industrial Complex. *Bulletin NGIEI*. 2024;(8):84–95. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2326 (accessed 22.02.2025).
15. Khafizov D.F., Valiev A.R., Mukhametgaliev F.N., Mingazov A.I. Development of the Material and Technical Base of Agro-industrial Complex in the Context of Foreign Economic Sanctions. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2023;18(4):170–177. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-170-177>
16. Shamin A.E., Zaikin W.P., Lisina A.Yu. Grain Production in Russia: Achievements, Existing and Possible Problems. *Bulletin NGIEI*. 2022;(3):110–121. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-3-110-121>
17. Naorem A., Jayaraman S., Dang Y.P., Dalal R.C., Rao C.S., Patra A.K. Soil Constraints in an Arid Environment – Challenges, Prospects, and Implications. *Agronomy*. 2023;13(1):220. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010220>
18. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalsiy I.A. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46–51. Available at: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (accessed 22.02.2025).
19. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Comparison of the Efficiency of Different Types of Separating Devices when Strolling Grain on the Root. *Design, Use and Reliability of Agricultural Machinery*. 2024;(1):176–182. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/uxuoxf>
20. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Komogortsev V.F., Sinyaya N.V. To the Substantiation of the Method of Preliminary Separation of Free Grain in the Root of Plants. *Science in the Central Russia*. 2023;61(1):77–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-77-84>

21. Nikitin V.V., Ozherelev V.N. Influence of the Grid Inclination Angle on the Efficiency of Preliminary Separation of the Combed Heap. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):26–43. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.026-043>
22. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Device for Standing Plants Threshing. Patent 2566017 Russian Federation. 2015 October 20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/zftmnn>
23. Savin V.Yu., Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Separating Light Impurities from the Combed Heap in the Adapter Case. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):370–387. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.370-387>
24. Nikiforov V.M., Nikiforov M.I., Mameev V.V. Yield and Grain Quality of Spring Wheat Varieties in the Bryansk Region. *VESTNIK of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2020;(1):7–12. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.bgsha.com/download/education/library/v1_20.pdf (accessed 22.02.2025).
25. Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Emelyanovich S.V. Results of Investigations of Aerodynamic Properties of Grain Materials. *Science in the Central Russia*. 2023;61(1):100–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-100-107>
26. Anisimov A.V. The Results of Experimental Determination of Physical and Mechanical Properties of Materials Processed in a Peeling Machine. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(4):156–160. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_84.pdf (accessed 22.02.2025).
27. Lezhenkin I. Statistical Model of the Content of Chaff in Ochessannom Pile of Winter Wheat. *Bulletin Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*. 2013;132:355–360. Available at: <https://repo.btu.kharkiv.ua/items/75d61cb3-1909-4cbb-bea0-dd6b86cfd9c2> (accessed 27.02.2025).
28. Buryanov A.I., Pasechny N.I. [Justification of the Combine Harvester Class for Harvesting Grain by Combing]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva*. 2004;(4):21–23. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/rwamif>

Об авторах:

Савин Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры тепловых двигателей и гидромашин Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, Researcher ID: D-4378-2019, savinvu@bmstu.ru

Ожерельев Виктор Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>, Researcher ID: AAD-8298-2022, vicoz@bk.ru

Никитин Виктор Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>, Researcher ID: AAD-7368-2022, viktor.nike@yandex.ru

Адылин Иван Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>, vanro1989@mail.ru

Вклад авторов:

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

В. Н. Ожерельев – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

В. В. Никитин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

И. П. Адылин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 05.02.2025; поступила после рецензирования 19.06.2025;
принята к публикации 03.07.2025*

About the authors:

Vladimir Yu. Savin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Chair of Heat Engines and Hydromachines, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, Researcher ID: D-4378-2019, savinvu@bmstu.ru

Viktor N. Ozherelev, Dr.Sci. (Agric.), Professor, Professor of the Chair of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>, Researcher ID: AAD-8298-2022, vicoz@bk.ru

Viktor V. Nikitin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Technical Service Chair, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>, Researcher ID: AAD-7368-2022, viktor.nike@yandex.ru

Ivan P. Adylin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>, vanro1989@mail.ru

Authors contribution:

V. Yu. Savin – conducting the study including performing experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and the data obtained.

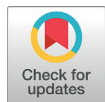
V. N. Ozherelev – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the study ideas, goals and objectives; conducting the study including experiments and data collection; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by members of the research group, including at the stages before and after publication.

V. V. Nikitin – conducting the study, including performing experiments and collecting data; preparing the manuscript: writing a draft of the manuscript.

I. P. Adylin – conducting the study including performing experiments or collecting data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 05.02.2025; revised 19.06.2025; accepted 03.07.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.658-677>EDN: <https://elibrary.ru/fxrkpx>

УДК / UDK 631.362.3:633.1

Оригинальная статья / Original article

**Оценка возможности плющения
микронизированного фуражного зерна**

Ф. А. Киприянов✉, **П. А. Савиных**
*Федеральный аграрный научный центр
Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,
г. Киров, Российская Федерация*

✉ kipriyanovfa@bk.ru**Аннотация**

Введение. Микронизация фуражного зерна, повышая усвояемость корма, приводит к его повышенной хрупкости. Это затрудняет процесс плющения из-за риска переизмельчения материала и определяет актуальность исследований в области оптимизации технологии плющения микронизированного зерна.

Цель исследования. Оценка возможности использования плющения в качестве метода подготовки микронизированного зерна для кормления сельскохозяйственных животных.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования было выбрано зерно ячменя и ржи, микронизированное с помощью инфракрасного излучения без предварительного увлажнения. На первом этапе исследования производилось плющение микронизированного зерна без предварительной подготовки. На втором этапе плющению подвергалось увлажненное микронизированное зерно, после чего оценивалась влажность полученной хлопьевидной фракции и проводился рассев на соответствие зоотехническим требованиям.

Результаты исследования. В результате проведенных исследований был установлен оптимальный режим плющения, обеспечивающий формирование хлопьевидной фракции: частота вращения валцов 300 об/мин и зазор между ними 0,7 мм. Оптимальным режимом увлажнения является добавление влаги в микронизированный ячмень до 10 % перед плющением с продолжительностью влагонасыщения в течение 15 мин. Процесс плющения позволил получить продукт следующего состава: мучная фракция – 1,7 %, хлопьевидная – 94 % и фракция, проходящая через сито 2,5 мм – 3,95 %. Толщина плющенных зерновок при этом составила 1,67 мм. Плющение микронизированного зерна ржи на оптимальных режимах позволило получить хлопьевидную фракцию в количестве 89 % при толщине хлопьев 1,36 мм, проходе через отверстие 2,5 мм в количестве 5,16 % при мучной фракции порядка 2 %.

Обсуждение и заключение. Насыщение микронизированного зерна влагой повышает пластичность зерновок, что обеспечивает получение хлопьевидной фракции, выход которой соответствует зооветеринарным требованиям. Использование гладких валцов на плющилке положительным образом сказывается на снижении количества мучной фракции, делая плющение одним из способов подготовки микронизированного фуражного зерна для кормления сельскохозяйственных животных.

© Киприянов Ф. А., Савиных П. А., 2025



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

Ключевые слова: хлопьевидная фракция, мучная фракция, зерно, плющение, насыщение зерна влагой, плющенное зерно

Финансирование: работа выполнялась в рамках программы исследований по теме FNWE-2022-0002 «Создание высокоэффективных машинных технологий и технических средств для механизации растениеводства и животноводства, адаптированных к особенностям климатических условий Северо-Востока Европейской части России» (№ 1021060407719-4), 2022–2024 гг.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Киприянов Ф.А., Савиных П.А. Оценка возможности плющения микронизированного фуражного зерна. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):658–677. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.658-677>

Assessment of the Possibility of Flattening Micronized Feed Grain

F. A. Kipriyanov[✉], P. A. Savinykh
*Federal Agricultural Research Center
of the North-East named N. V. Rudnitsky,
Kirov, Russian Federation*

[✉] kipriyanovfa@bk.ru

Abstract

Introduction. The micronization of feed grain allows improving the digestibility of grain feed. However, flattening micronized grain to feed animals is difficult because of its increased fragility that results in grain overflattening during the flattening process. This problem provides relevance of the study in the field of flattening micronized feed grains used to feed animals.

Aim of the Study. The study is aimed at evaluating the applicability of flattening as a way to prepare micronized grain for feeding agricultural animals.

Materials and Methods. The object of the study was the barley and rye grains micronized with infrared radiation without pre-moistening. On the first stage of the study, the micronized grains were flattened without preliminary moisturizing, on the second stage the moistened micronized grains were flattened and then the prepared flaky fraction moisture was evaluated and the prepared flaky fraction was sifted to verify that it meets the zootechnical requirements.

Results. It has been found that the optimal flattening mode for preparing the flaky fraction is the one when the rotational rate of the rollers is 300 r/min and spacing between the rollers is 0.7 mm. The optimal moisture regime is adding up to 10% of moisture into micronized barley grains before flattening with the moisturizing duration of 15 min. After flattening the amount of floury fraction was about 1.7% when the flaky part was 94% and the fraction passing through a 2.5 mm sieve was 3.95%, the thickness of flattened caryopsides was 1.67 mm. The flattening of micronized rye grains with the use of optimal regimes made it possible to prepare the flaky fraction in the amount of 89% with the flake thickness of 1.36 mm, passing through the sieve passage of 2.5 mm in the amount of 5.16% when the floury fraction was about 2%.

Discussion and Conclusion. Moisturing of micronized grains allows improving the plasticity of caryopsides and provides the receiving of the flaky fraction, the yield of which meets the zoo-veterinary requirements. The usage of smooth rollers for a grain flattener results in the decrease of the floury fraction amount and makes flattening one of the ways to prepare micronized feed grains for feeding of agricultural animals.

Keywords: flaked fraction, floury fraction, grain, flattening, moisturizing, flattened grain

Funding: The work was carried out within the framework of the research program on the topic FNWE-2022-0002 “The creation of highly efficient machine technologies and technical means for mechanization of plant growing and animal breeding, acclimated to conditions of the North-West of the European part of Russia” (No. 1021060407719-4), 2022–2024.

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

For citation: Kipriyanov F.A., Savinykh P.A. Assessment of the Possibility of Flattening Micronized Feed Grain. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):658–677. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.658-677>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность производства молока более чем на 50 % зависит от сбалансированности и энергонасыщенности рациона крупного рогатого скота (КРС). Основная доля энергии, поступающая из корма, как правило, содержится в концентрированных кормах, однако для обеспечения продуктивного долголетия животных доля концентрированных кормов в рационе должна быть ограничена [1]. Соответственно, ограничен и верхний порог энергии, находящейся в концентрированных кормах, что подчеркивает важность исследований, посвященных максимальному усвоению питательных веществ из ограниченного количества корма.

К. Эрхардт с коллегами приходят к выводу, что доля нерасщепленного протеина в рубце высокопродуктивных коров с удоем свыше 30 кг должна находиться на уровне 35–40 %. Задача приготовления концентрированных кормов заключается в замедлении расщепления белка в рубце животных и переводе его усвоения в тонкий кишечник¹. Одним из способов замедления расщепления протеина является его денатурация в результате термической обработки, что, согласно рекомендациям Всероссийского научно-исследовательского института кормов имени В. Р. Вильямса, позволяет увеличить количество нерасщепляемого в рубце сырого протеина в среднем до 40 %². Наряду с денатурацией белка термическая обработка является эффективным решением для повышения ферментативного переваривания крахмала в тонком кишечнике КРС, что позволяет уменьшить количество крахмала, попадающего в толстый кишечник животных [2].

Микронизация выступает одним из способов тепловой обработки зерна, повышающих усвоение концентрированных кормов (обработка зернового материала инфракрасным излучением) [3]. При микронизации происходит увеличение степени усвоения энергии из зерна, денатурация белка и клейстеризация крахмала, что способствует перевариванию крахмала в рубце жвачных животных [2; 4].

Тепловая обработка в целом и микронизация как один из ее видов способствуют увеличению содержания сахара в расчете на абсолютно сухое вещество вплоть до 73,4 г/кг за счет частичного гидролиза крахмала [5].

Цель исследования – оценка эффективности плющения как метода получения микронизированного зерна для кормовых целей в животноводстве.

¹ Эрхардт К., Веаутир Б., Веаутир Г. Кормовые бобы, горох и другое белковое сырье в кормлении КРС. Проект Soft-agro.com [Электронный ресурс]. URL: <https://agro-matik.ru/assets/img/upload/2018/03/30/Gorokh-KRS.pdf> (дата обращения: 15.08.2024).

² Организация полноценного кормления высокопродуктивных коров (рекомендации). М.: ФГУ РЦСК; 2008. 58 с.

Задачи исследования:

- 1) выявить особенности изменения строения и свойств зерновок после микронизации;
- 2) обосновать режимы увлажнения и последующего плющения микронизированного зерна для получения хлопьевидной фракции;
- 3) оценить плющенное микронизированное зерно на соответствие зооветеринарным требованиям.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Одним из эффективных способов, позволяющих увеличить энергетическую ценность концентрированных кормов, является тепловая обработка зерна, где микронизация представляет собой наиболее перспективный вид температурного воздействия [6].

По мнению Н. П. Мишурова микронизация – наиболее эффективный вариант приготовления кормов, так как использование микронизированного зерна в рационе способствует увеличению привеса поросят-отъемышей до 15,3 % при снижении затрат кормов до 12,7 % [7]. Данный способ также обеспечивает эффективное подавление патогенных микроорганизмов в зерне, поскольку максимальная температура для термофильных микроорганизмов составляет порядка 70–80 °С. В свою очередь, ученые института технического обеспечения сельского хозяйства в исследовании, проведенном в области обеззараживания зерна, приводят следующие результаты: при микронизации ячменя с продолжительностью экспозиции 30 с степень обеззараживания поверхностной микрофлоры составляет 99,7 %, при этом глубинная микрофлора уничтожается на 98 % [8]. В ряде работ отмечается положительное влияние микронизации на питательные и антипитательные свойства зернового материала [9; 10].

Влиянию микронизированного корма в рационе на продуктивность животных посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных ученых, в которых фиксируется положительное воздействие его применения. В частности, И. В. Иванова отмечает положительное влияние применения микронизированных кормов на обмен веществ и биохимические показатели крови животных [11].

Включение в состав рациона телят молочного периода цельного зерна стимулирует процессы переваривания питательных веществ [12]. К аналогичному заключению пришел коллектив иностранных ученых, подчеркивающий нецелесообразность измельчения зерна при кормлении молодняка телят [13].

Кормление цельным микронизированным зерном кукурузы показало большую эффективность по сравнению с кормлением измельченным зерном, оказав лучшее влияние на рост мышечной массы и формирование скелета молодняка КРС [14].

Учитывая положительное действие цельного зерна на рост и развитие молодняка, перспективным с энергетической точки зрения может быть скармливание цельного микронизированного зерна молодняку КРС, позволяющее компенсировать энергозатраты растущего организма животного.

Однако преобладающее количество зерна, в том числе и микронизированного, часто требует дополнительной подготовки к скармливанию. Процесс дальнейшего приготовления микронизированного зерна требует более глубокого изучения. Во избежание развития патогенной микрофлоры приготовление зерна должно осуществляться непосредственно перед кормлением животных или максимально близко к нему [15].

Аналогичного взгляда о необходимости использования микронизированного зерна в измельченном или плющеном виде при кормлении сельскохозяйственных животных придерживается ряд зарубежных ученых. Так, С. Х. Эбрахими считает, что только термическая обработка не гарантирует более высокую энергетическую ценность обработанного зерна, поскольку на усвояемость будет влиять форма и размер частиц, поступающих в организм животного [2]. Измельчение – это процесс, который в большинстве случаев следует за микронизацией и воздействует на клейстеризацию крахмала [16]. Зарубежные исследователи указывают на недостаточную представленность в научной литературе сведений, подвергалось ли зерно измельчению или обработке после микронизации [17].

Таким образом, в исследованиях, посвященных микронизации и кормлению микронизированным зерном, необходимо уделить внимание как параметрам нагрева зерна, так и технологии подготовки микронизированного зерна к скармливанию.

Плющенное зерно, величина которого достигает 81–87 %, за счет своей формы обладает более эффективной энергоотдачей по сравнению с дробленным. Это связано с лучшим коэффициентом его усвояемости, обеспечиваемым за счет разрушения зерновой оболочки. При этом средний коэффициент усвояемости дробленого зерна находится на уровне 45 % [14].

Использование сухого плющеного зерна вместо традиционного дробленого позволяет повысить мясную продуктивность бычков на 11,7 %, при этом переваримость питательных веществ и, в частности сухого вещества, возрастает на 1,6 % [18].

Положительного результата по плющению изначально сухого фуражного зерна добился коллектив ученых под руководством В. А. Афанасьева [19]. Исследователи предлагают проводить влагонасыщение зерна, его пропаривание и дальнейшее плющение до уровня 18–20 %, что приведет к увеличению энергоемкости полученных хлопьев, несмотря на очевидное снижение количества мучной фракции [19].

А. А. Курдоглан отмечает, что использование плющеной зерновой смеси при раздое коров в начальный период лактации позволяет повысить продуктивность животных и качество молока [20].

Использование микронизированного зерна для получения хлопьев позволит сочетать положительные свойства микронизации и плющения зерна. А. Н. Остриков предлагает технологию получения микронизированных хлопьев, отмечая при этом улучшение вкусовых качеств зерна и снижение уровня патогенной микрофлоры на 99,5 % [21]. Однако в основе такой технологии лежит тот же длительный процесс подготовки зернового материала для обеспечения его

пластичности, включающий предварительное влагонасыщение и отволаживание, что уменьшает экономическую эффективность кормления полученными хлопьями.

Основной проблемой, препятствующей плющению микронизированного зерна без предварительной подготовки, является изменение в структуре зерновки. Происходит значительное снижение усилия разрушения зерновки [22], что требует корректировки режимов измельчения микронизированного зерна. По мнению С. В. Зверева, при измельчении микронизированного зерна свободным ударом необходимо изменение угловой скорости молотков³.

Существующие технологии получения хлопьев из микронизированного фуражного зерна энергоемки и требуют довольно больших временных затрат [21]. В связи с этим актуальными будут исследования по разработке и апробации технологии получения плющеного микронизированного зерна с минимальной продолжительностью технологического процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектами исследования является фуражное зерно ячменя и ржи, микронизированное с помощью инфракрасного излучения без предварительного увлажнения и процессы его дальнейшего плющения и насыщения влагой для получения хлопьевидной фракции.

Методы и материалы исследования

В процессе проведения исследования применялся комплекс общенаучных методов, включающий анализ литературных источников, моделирование при построении математических моделей изучаемых процессов, метод конкретизации для детального анализа влияния режимов работы вальцовой плющилки на толщину хлопьевидной фракции, метод обобщения для формулирования выводов по результатам проведенного эксперимента.

Микронизация зерна осуществлялась коротковолновым источником инфракрасного излучения типа QNL мощностью 1 500 Вт. После микронизации зерна, нагрев которых ввиду неоднородности теплового поля был недостаточен для внутренних изменений, отделялись на семяочистительной машине СМ 0,15. Для определения толщины хлопьевидной фракции применялся абсолютный метод измерения, согласно которому индикаторная головка часового типа ИЧ-05 0,01 с плоским измерительным наконечником устанавливалась на плоскую поверхность с предварительным натягом 1 мм, после чего указатель шкалы головки приводился в нулевое положение. Для измерения толщины зерновки наконечник отводился от поверхности, под него помещалась зерновка, наконечник отпускался и производилось измерение толщины путем считывания показаний непосредственно со шкалы прибора (рис. 1).

³ Зверев С.В. Высокотемпературная микронизация в производстве зернопродуктов: моногр. М.: ДеЛи принт; 2009. 221 с. <https://elibrary.ru/qnhxob>



Р и с. 1. Прибор измерения толщины хлопьевидной фракции

F i g. 1. Measuring the thickness of flaky fraction

Источник: здесь и далее в статье все фотографии сделаны Ф. А. Киприяновым в ходе проведения экспериментальных исследований.

Source: hereinafter in this article the photos for the figures were made by F. A. Kipriyanov during the experimental studies.

Оборудование и процедура исследований

Для проведения экспериментальных исследования использовалось следующее оборудование: лабораторный рассев У1-ЕРЛ, электронные весы с точностью 0,01 г для измерения массы остатка на ситах лабораторного рассева, плющилка вальцовая с гладкими вальцами $d = 220$ мм, $l = 255$ мм и синхронным приводом с возможностью регулировки частоты вращения вальцов, электронные весы с точностью 1 г для контроля массы увлажняющей жидкости, пульверизатор ручной для увлажнения зерна, влагомер зерна Wile-65, шкаф сушильный электрический, индикаторная головка часового типа ИЧ-05 0,01 с ценой деления 0,01 мм на штативе для измерительных головок Ш-ПВ, программное обеспечение Statgraphics Centurion 18, MS Excel.

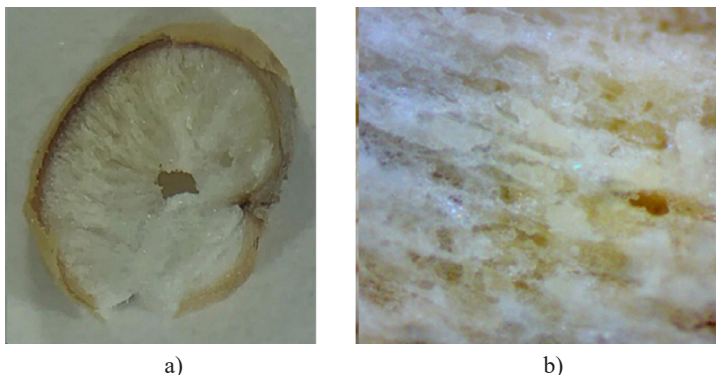
Определение влажности микронизированного зерна проводилось в два этапа: предварительная оценка с помощью влагомера Wile-65, последующее измерение в сушильном электрическом шкафу по ГОСТ 13586.5-2015⁴. Процесс плющения осуществлялся на плющилке с гладкими вальцами с последующим рассевом полученных проб. На первоначальном этапе осуществлялось плющение микронизированного зерна без предварительной подготовки. Основной этап исследований включал в себя плющение предварительно увлажненного микронизированного зерна различной влажности с последующим контролем влажности полученной хлопьевидной фракции и оценкой полученных результатов в соответствии с зоотехническими требованиями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На предварительном этапе установлено, что в результате микронизации происходит снижение усилия разрушения зерновки более чем в два раза, сопровождающееся изменением его внутреннего строения [23]. Структурные изменения,

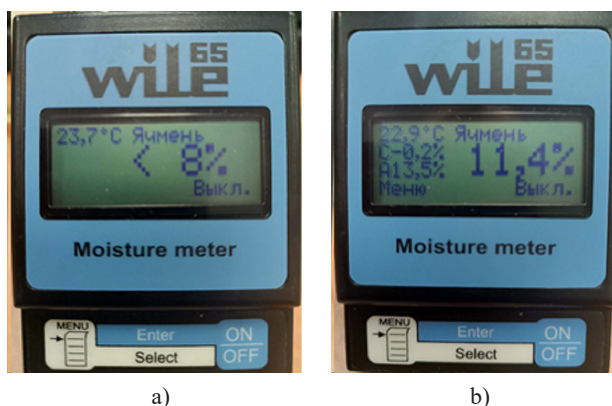
⁴ ГОСТ 13586.5-2015. Зерно. Метод определения влажности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124082> (дата обращения: 21.11.2024).

происходящие в зерновке при микронизации с образованием большого количества пустот, и потеря микронизированной зерновкой влаги в результате инфракрасного облучения делают практически невозможным получение хлопьевидной фракции после плющения. Зерновка превращается в пористый хрупкий материал (рис. 2) [23].



Р и с. 2. Внутреннее строение зерновки после микронизации:
а) поперечный разрез; б) проявление капиллярного строения
F i g. 2. Internal structure of caryopsis after the micronization:
а) cross section; б) showing the capillary structure

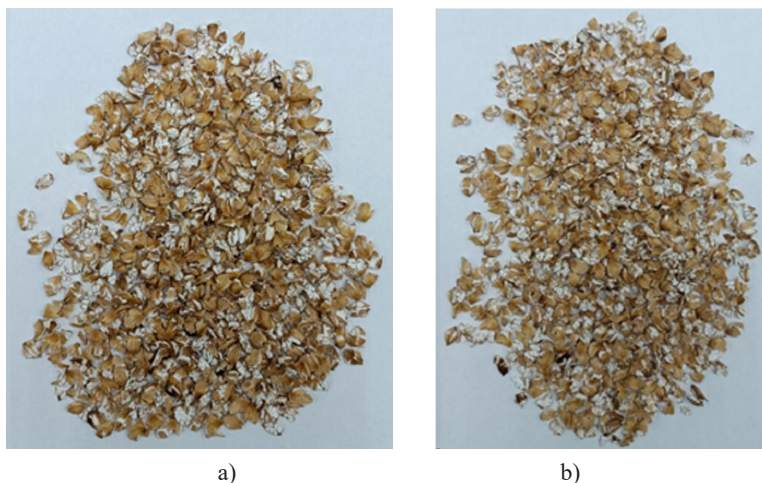
Для оценки степени влажности зерна до и после процесса микронизации проведено измерение содержания количества влаги в зерне. Первоначальное измерение влажности зерна проводилось с помощью влагомера модели типа Wile-65. Однако прибор оказался нечувствительным к уровню влажности микронизированного зерна (рис. 3а), в то время как влажность немикронизированного зерна была определена на уровне 11,4 % (рис. 3б).



Р и с. 3. Примеры измерения влажности влагомером модели Wile-65:
а) микронизированное зерно; б) немикронизированное зерно
F i g. 3. The examples of measuring moisture with the moisture meter Wile-65:
а) micronized grain; б) non-micronized grain

Измерение влажности в сушильном шкафу позволило получить следующие значения: влажность исходного немикронизированного ячменя составила 10,9 %, в то время как влажность микронизированного зерна – 4,4 %. Таким образом, низкое значение влажности микронизированного зерна (по результатам измерения снижение влажности более чем в два раза) является основной причиной снижения пластичности зерновок, что препятствует их эффективному плющению.

Для повышения эластичности зерновок было принято решение об увлажнении микронизированного зерна. Постепенное добавление жидкости на поверхность зернового материала с последующим перемешиванием для равномерного распределения влаги в зерновках позволило определить минимальное количество жидкости для формирования хлопьевидной фракции при плющении микронизированного зерна. Так, добавление всего 5 % жидкости позволило получить приемлемые результаты по формированию хлопьевидной фракции даже при увеличении числа оборотов вальцов (рис. 4).

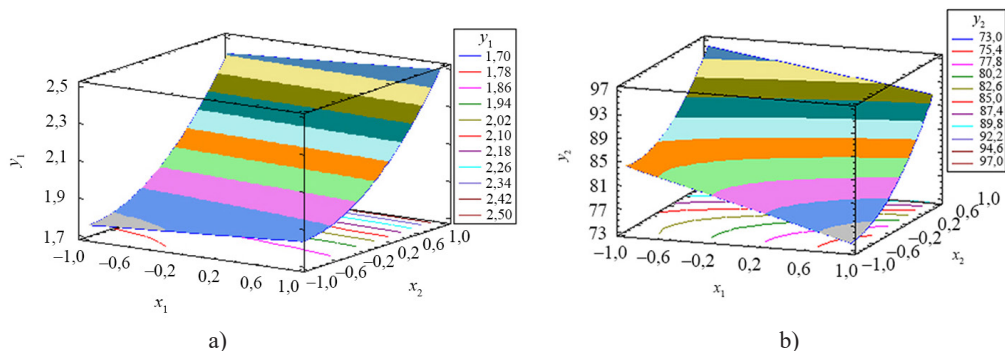


Р и с. 4. Примеры плющеного микронизированного зерна с добавлением 5 % влаги:
а) зазор 1 мм, $n = 300$ об/мин; б) зазор 1 мм, $n = 600$ об/мин

F i g. 4. The samples of flattened grains with addition of 5% moisture:
a) clearance gap 1 mm, $n = 300$ r/min; b) clearance gap 1 mm, $n = 600$ r/min

Следующий этап исследований посвящен поиску режима плющения микронизированного зерна, соответствующего зоотехническим требованиям. Так, для КРС толщина хлопьев после плющения должна находиться в интервале от 1 до 1,8 мм [24; 25]. Для поиска оптимального значения проведен полнофакторный эксперимент, в котором варьируемыми факторами являлись частота вращения вальцов с уровнями варьирования 100, 300 и 500 об/мин, а также зазор между вальцами с уровнями варьирования 0,7, 1,0 и 1,3 мм. Критериями оптимизации приняты: y_1 – толщина плющенных зерновок, мм; y_2 – количество хлопьевидной фракции, % (остаток на сите Ø 4 мм).

По результатам обработки экспериментальных данных получены поверхности отклика (рис. 5) и описывающие их математические модели (1), (2).



Р и с. 5. Графическое представление математических моделей:
 а) толщина плющенных зерновок; б) количество хлопьевидной фракции
 F i g. 5. Graphical representation of mathematical models:
 а) the thickness of flattened caryopsides; б) the amount of flaky fraction

Источник: графики составлены авторами статьи в программе Statgraphics Centurion 18.

Source: the graphics were prepared by the authors of the article in the program Statgraphics Centurion 18.

$$y_1 = 1,97 + 0,04x_1 + 0,34x_2 + 0,16x_2^2; \quad (1)$$

$$y_2 = 82,33 - 3,83x_1 + 7,33x_2 + 1,25x_1x_2 + 4,0x_2^2, \quad (2)$$

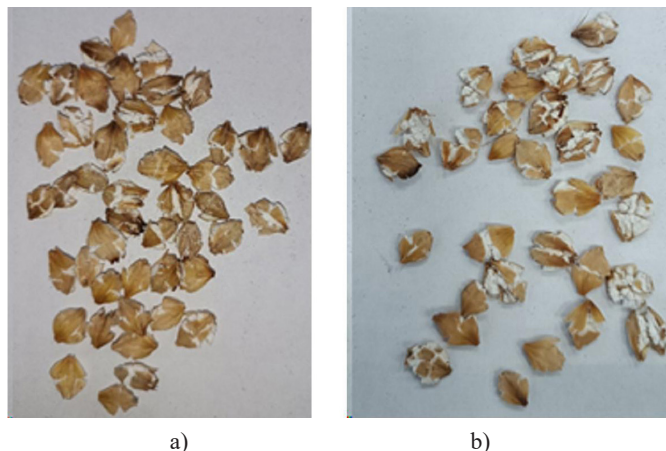
где x_1 – частота вращения вальцов, об/мин; x_2 – зазор между вальцами, мм; y_1 – толщина плющенных зерновок, мм; y_2 – количество хлопьевидной фракции, %.

Коэффициент детерминации для полученных уравнений: для уравнения (1) $R^2 = 99,4 \%$; для уравнения (2) $R^2 = 99,6 \%$. Можно констатировать, что полученные математические зависимости довольно точно описывают рабочий процесс.

Основным фактором, влияющим на толщину хлопьев и количество хлопьевидной фракции, является зазор между вальцами, при увеличении которого толщина хлопьев (1) и количество хлопьевидной фракции (2) будут ожидаемо увеличиваться. Повышение частоты вращения будет приводить к снижению количества хлопьевидной фракции. В связи с этим необходимо подобрать режимы плющения микронизированного зерна, обеспечивающие соответствие зоотехническим требованиям.

Обеспечение толщины хлопьев для кормления КРС будет достигнуто при обработке зернового материала с зазором между вальцами 0,7 мм в диапазоне частот вращения вальцов от 100 до 500 об/мин. Наиболее оптимальным режимом при этом будет частота вращения вальцов 300 об/мин, что при существующих размерах вальцов обеспечит линейную скорость в зоне плющения 3,45 м/с, что значительно ниже значений скорости, необходимой для плющения (8–8,5 м/с), полученных другими исследователями [26]. Выход хлопьевидной фракции, по полученной математической модели (2) составит порядка 79 % при количестве мучной фракции 2,1 %. Очевидно, что при увеличении зазора количество хлопьевидной фракции повысится при снижении мучной фракции, однако толщина зерновок превысит оптимальные для кормления КРС значения.

Следует также отметить, что при плющении с зазором 0,7 мм увеличение числа оборотов с 100 до 300 об/мин способствует лучшему раскрытию внутреннего строения зерновки (рис. 6), что стимулирует более полное усвоение питательных веществ в организме животного.



Р и с. 6. Плющенное микронизированное зерно:
а) зазор 0,7 мм, $n = 100$ об/мин; б) зазор 0,7 мм, $n = 300$ об/мин

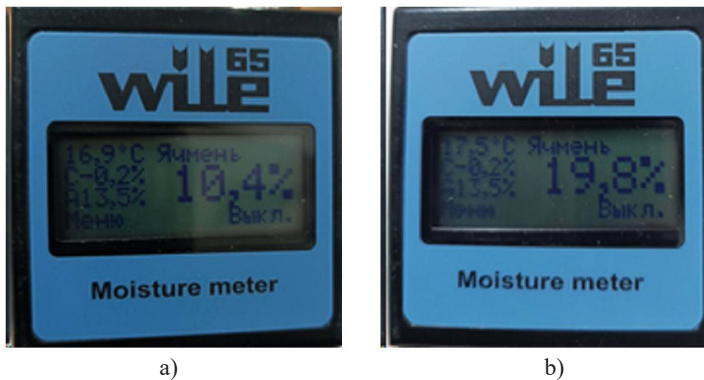
F i g. 6. Flattened micronized grains:
а) clearance gap 0.7 mm, $n = 100$ r/min; б) clearance gap 0.7 mm, $n = 300$ r/min

При экспериментальной проверке оптимального режима плющения зерновок, определенного по математической модели (2) на соответствие толщины зерновок зоотехническим требованиям, установлено, что при плющении микронизированного зерна после добавления 5 % жидкости на гладких вальцах с зазором 0,7 мм и частотой вращения $n = 300$ об/мин толщина хлопьевидной фракции составляет 1,77 мм, что соответствует зоотехническим требованиям по толщине плющенных зерновок для КРС.

В ходе эксперимента по плющению увлажненного микронизированного зерна выявлено, что добавление 5 % жидкости к массе микронизированного зерна для повышения эластичности зерновок существенно не сказалось на влажности хлопьевидной фракции и при измерении влажности образца электронным влагомером не превышает порога чувствительности используемого прибора (влажность на приборе указывалась как $< 8 \%$).

Для определения допустимого увлажнения микронизированного ячменя производилось последовательное, пошаговое увлажнение зерна, добавлялось 10 и 15 % воды от массы увлажняемого зерна. После этого проводилось его плющение, оценивалась влажность хлопьевидной фракции.

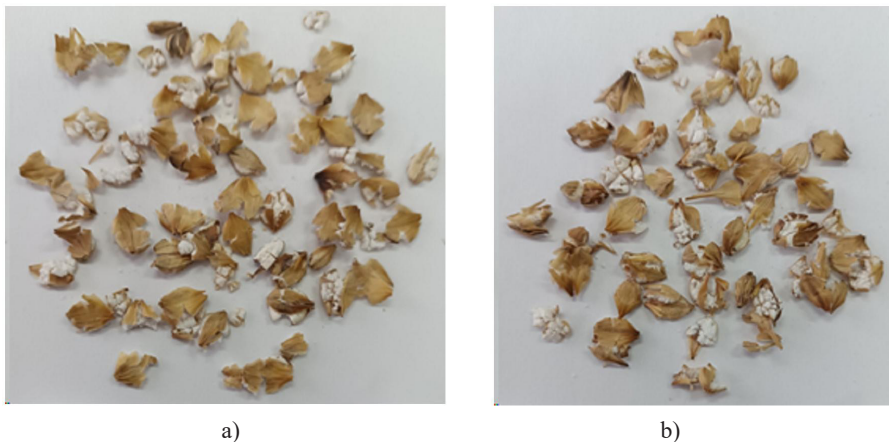
В результате эксперимента установлено, что при добавлении 10 % жидкости к массе микронизированного зерна при проверке влагомером влажность хлопьевидной фракции не превышает допустимого значения, для сухого фуражного зерна (рис. 7 а), тогда как добавление 15 % жидкости приводит к переувлажнению зерна (рис. 7 б).



Р и с. 7. Влажность хлопьевидной фракции после плющения увлажненных хлопьев:
a) 10 %; b) 15 %

F i g. 7. Flaky fraction moisture after flattening of moistened flakes:
a) 10%; b) 15%

По результатам рассева плющеного зерна при добавлении 10 % жидкости количество мучной фракции составило порядка 2 %, при количестве хлопьевидной фракции 90 % (рис. 8 а). Добавление увлажняющей жидкости до 15 % снижает количество мучной фракции в рассеве до 1 % при увеличении хлопьевидной фракции до 93 % (рис. 8 б).

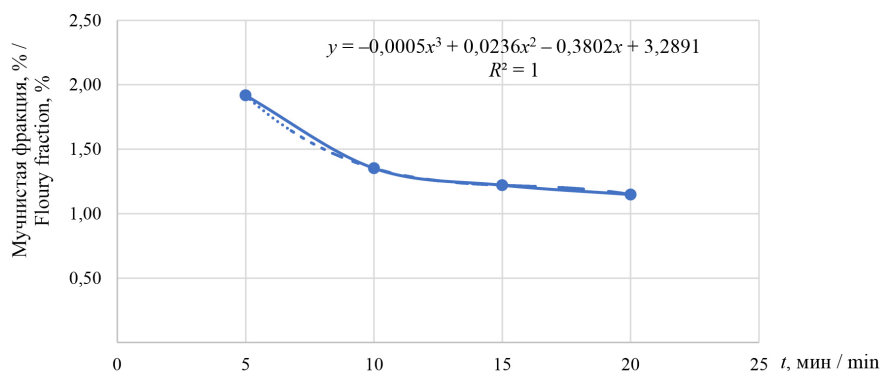


Р и с. 8. Фрагмент хлопьевидной фракции после плющения
увлажненного микролизированного зерна:
a) 10 %; b) 15 %

F i g. 8. Fragment of flaky fraction after flattening of moistened micronized grain:
a) 10%; b) 15%

Однако, учитывая, что 15 % увлажнение приводит к переувлажнению хлопьевидной фракции и может отрицательно сказаться на сохранности зерна, наиболее оптимальным режимом увлажнения является добавление 10 % жидкости к массе микролизированного зерна.

В ходе проведенных исследований по оценке влияния увлажнения на количество мучной фракции выдвинута рабочая гипотеза: продолжительность увлажнения окажет влияние на результаты рассева плющеного зерна. Для изучения высказанного предположения проведена серия экспериментов, в ходе которых изменялась продолжительность увлажнения зерновок: время увлажнения составило 5, 10, 15 и 20 мин. В результате исследований получена зависимость влияния продолжительности увлажнения на количество мучной фракции (рис. 9), с высокой точностью аппроксимируемая полиномом 3-й степени.



Р и с. 9. Влияние продолжительности увлажнения на количество мучной фракции
F i g. 9. The influence of moistening duration on the amount of floury fraction

Источник: график составлен авторами статьи.

Source: the graphic was prepared by the authors of the article.

Количество мучной фракции при увлажнении в течение 10 мин составило 1,35 %, что на 29 % меньше, чем при увлажнении в течение 5 мин. Увлажнение в течение 15 мин позволило снизить количество мучной фракции до 1,22 %, что относительно десятиминутного увлажнения меньше на 10 %. Уровень снижения относительно увлажнения в течение 15 мин составил 6 %, несмотря на то, что дальнейшее увеличение продолжительности увлажнения до 20 мин также позволило снизить количество мучной фракции. Таким образом, увлажнение более 15 мин нецелесообразно, для практических целей можно порекомендовать увлажнение в интервале от 10 до 15 мин.

Сравнительная оценка плющения немикронизированного зерна ячменя на установленных режимах (зазор между вальцами 0,7 мм, частота вращения вальцов 300 об/мин) позволила сделать вывод, что, несмотря на относительно невысокое количество мучной фракции (табл. 1), хлопьевидную составляющую сформировать не удалось (рис. 10).

Остаток на решетке 4 мм (рис. 10 а) по внешнему виду существенно отличается от хлопьевидной фракции, полученной при плющении микронизированного увлажненного зерна (рис. 8 а). Увлажнение немикронизированного зерна несколько увеличило выход крупной составляющей (табл. 1), но принципиального влияния на качество хлопьев не оказало (рис. 10 б).

Таблица 1

Table 1

Распределение фракций по решетам лабораторного рассева (ручная подача), %

Distribution of fractions on the screen of laboratory plansifter (hand feeding), %

Диаметр отверстий решета, мм / Diameter aperture of screen, mm	Режимы подготовки зерна / Regimes of grain preparation		
	микронизированное увлажненное / micronized moistened	немикронизированное / non-micronized	немикронизированное увлажненное / non-micronized moistened
4,0	94,7	31,4	74,8
3,5	0,8	17,7	11,9
3,0	0,5	8,5	2,4
2,5	0,5	11,5	2,7
2,0	0,5	12,5	2,3
1,5	0,5	8,7	2,4
1,0	0,7	4,8	1,6
0,5	0,5	2,3	1,0
0	1,2	2,6	1,1



а)



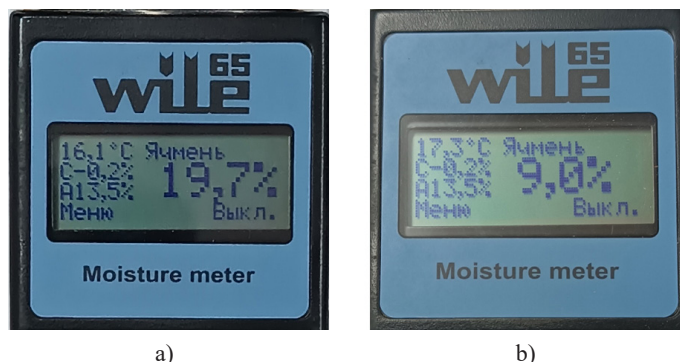
б)

Рис. 10. Результаты плющения немикронизированного зерна, зазор 0,7 мм, $n = 300$ об/мин
а) сухое; б) увлажненноеFig. 10. The results of the flattening non-micronized grain, clearance gap 0.7 mm, $n = 300$ r/min
a) dry; b) moistened

Анализ вида зерновок после плющения немикронизированного зерна на режимах для микронизированного зерна (рис. 10) показал, что режим плющения микронизированного увлажненного зерна не подходит для плющения немикронизированного зерна. В частности, наличие целых зерновок говорит о необходимости уменьшения зазора между вальцами.

Также в процессе увлажнения немикронизированного зерна отметили, что скорость впитывания увлажняющей жидкости существенно ниже, чем при увлажнении микронизированного зерна. Отмеченная особенность косвенным образом

отразилась на влажности хлопьев увлажненного немикронизированного зерна после плющения, влажность которых составила 19,7 %, тогда как влажность хлопьев после увлажнения микронизированного зерна в течение 15 мин не превысила 10 % (рис. 11).



а)

б)

Р и с. 11. Влажность хлопьев после плющения:
а) увлажненное немикронизированное; б) увлажненное микронизированное

Fig. 11. Moisture of flakes after the flattening:
a) moistened non-micronized; b) moistened micronized

Проведение эксперимента по плющению микронизированного увлажненного зерна при бункерной подаче и рассев полученных проб показал, что при количестве хлопьевидной фракции для ячменя свыше 90 %, для ржи около 90 % количество мучной фракции составило 1,69 и 2,13 % соответственно (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Table 2

Остаток на решетках рассева при бункерной подаче зерна, %
The grain residue on the screens of plansifter when using bunker feeding of grain, %

Диаметр отверстий решета, мм / Diameter of screen holes, mm	Ячмень / Barley	Рожь / Rye
4,0	94,23	89,04
3,5	0,81	3,14
3,0	0,48	1,46
2,5	0,54	1,20
2,0	0,49	0,88
1,5	0,56	0,81
1,0	0,65	0,72
0,5	0,56	0,61
0	1,69	2,13

Толщина плющенных зерновок по результатам измерения: ячмень – 1,67 мм; рожь – 1,36 мм. Проход сита 2,5 мм составил для ячменя 3,95 %, для ржи 5,16 %, что соответствует требованиям ТУ 8-22-39-88⁵ и составляет для ячменных хлопьев 6 %.

⁵ ТУ 8-22-39-88. Хлопья ячменные и перловые. URL: <https://www.standards.ru/document/3273962.aspx> (дата обращения: 21.11.2024).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плющение микронизированного зерна ячменя и ржи с формированием хлопьевидной фракции на уровне 90 % и выше возможно при добавлении 10 % жидкости к массе зерна при продолжительности распределения влаги в зерне от 10 до 15 мин. Использование гладких валцов с частотой вращения 300 об/мин и зазором 0,7 мм позволит обеспечить толщину зерновок в интервале от 1 до 1,8 мм, что соответствует зооветеринарным требованиям, при этом проход сита 2,5 мм не превышает требования ТУ 8-22-39-88 и составляет для ячменя 3,95 %, для ржи – 5,16 %.

Полученные результаты позволяют обеспечить плющение микронизированного зерна, тем самым увеличив его усвояемость организмом, что положительным образом скажется на продуктивности животных. Однако, учитывая повышенную хрупкость микронизированного зерна, затрудняющую его плющение, необходима разработка установки для увлажнения микронизированного зерна, обеспечивающей заданный уровень насыщения зерновок влагой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.Д., Могиляницкий В.М., Перекопский А.Н., Шить И.С. Пути развития кормовой базы в Северо-Западном регионе России. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2001;(72):22–27. <https://elibrary.ru/sztrhx>
2. Varasteh F., Ebrahimi S.H., Naserian A.A., Zerehdaran S., Miri V.H. Effect of Micronization and Meal Size of Corn Grain on Glycemic Response and in Vitro Hindgut Acidosis Potential in Horses. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2024;132:104982. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104982>
3. Sajjadi H., Ebrahimi S.H., Vakili S.A., Rohani A., Golzarian M.R., Miri V.H. Operational Conditions and Potential Benefits of Grains Micronization for Ruminant: A Review. *Animal Feed Science and Technology*. 2022;287:115285. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115285>
4. Kalantari R.K., Rouzbehan Y., Fazaeli H., Direkvandi E., Salem A.Z.M. The Effect of Three Levels of Concentrate and Grain Processing on Feeding Behavior, Nutrient Digestibility, Blood Metabolites and Fecal pH of Turkish Horses. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2021;104:103690. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2021.103690>
5. Ситников В.А., Юнусова О.Ю., Панышев А.И., Попов А.Н. Использование питательных веществ рационов дойными коровами в зависимости от способа подготовки концентратов к скармливанию. *Пермский аграрный вестник*. 2016;(1):64–69. URL: https://agrovest.psaa.ru/wp-content/uploads/2017/09/agr_vest13.pdf (дата обращения: 03.02.2025).
6. Мишуров Н.П., Давыдова С.А., Давыдов А.А. Перспективные технологии повышения качества комбикормов. *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2019;(3):4–11. <https://elibrary.ru/qlphlq>
7. Мишуров Н.П., Давыдова С.А., Давыдов А.А. Инновационные способы тепловой обработки комбикормов. *Техника и оборудование для села*. 2019;(3):2–7. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-3-2-7>
8. Благов Д.А., Митрофанов С.В., Панферов Н.С., Тетерин В.С., Гапеева Н.Н. Влияние физических факторов на качественные показатели зерновых кормов. *Все о мясе*. 2021;(3):19–25. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-3-19-25>
9. Белов А.А. Влияние микроволновой обработки на антипитательные вещества соевых бобов. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2024;91(4):386–393. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-627483>
10. Белов А.А. Влияние микроволновой обработки на питательные факторы соевых бобов. *Техника и оборудование для села*. 2024;32–35. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-8-32-35>

11. Иванова И.В., Кузнецов А.Ф., Зенков К.Ф., Мебония Е.Г. Сравнительная оценка эффективности применения микронизированных кормовых добавок при выращивании телят на молочном комплексе. *Международный вестник ветеринарии*. 2018;(4):88–93. URL: <https://spbguv.m.ru/wp-content/uploads/2018/12/MBB-20184.pdf> (дата обращения: 15.02.2025).
12. Богданович И.В. Влияние включения цельного зерна кукурузы в рацион телят молочного периода выращивания на их дальнейшую продуктивность и переваримость питательных веществ кормов. *Зоотехническая наука Беларуси*. 2023;58(1):160–171. URL: <https://zootech.belal.by/jour/article/view/1748> (дата обращения: 15.02.2025).
13. Kamyab-Fard A., Yazdi M.H., Kazemi-Bonchenari M., Mahjoubi E. Inclusion of Whole Corn Grain in Forage-Free Starter Feeds in Holstein Dairy Calves: Determination of Optimum Level on Growth Performance, Rumen Fermentation, and Blood Metabolites. *Animal Feed Science and Technology*. 2023;304:115742. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115742>
14. Malekhhahi M., Ahmadi-zadeh M., Razzaghi A. Micronized Versus Super-Conditioned Corn: Effects on Starch Digestion, Performance, and Blood Metabolites of Holstein Dairy Calves. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(3):2381–2392. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24973>
15. Khiaosa-ard R., Czermak S., Hollmann M., Penagos-Tabares F., Sulyok M., Krska R. и др. Changes in Nutritional and Hygienic Quality Due to Storage of Common Native and Processed Grain Cereals Intended for Horse Feeding. *Journal of Stored Products Research*. 2024;106:102310. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102310>
16. Schwandt E.F., Hubbert M.E., Thomson D.U., Vahl C.I., Bartle S.J., Reinhardt C.D. A Survey of Starch Availability of Steam-Flaked Corn in Commercial Feedlots Evaluating Roll Size and Flake Density. *The Professional Animal Scientist*. 2016;32(5):550–560. <https://doi.org/10.1523/pas.2015-01496>
17. Pathiratne S.M., Shand P.J., Pickard M., Wanasundara J.P.D. Generating Functional Property Variation in Lentil (*Lens Culinaris*) Flour by Seed Micronization: Effects of Seed Moisture Level and Surface Temperature. *Food Research International*. 2015;76(1):122–131. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.026>
18. Морозова Н.И., Мусаев Ф.А., Морозов С.А., Шестакин А.Ю. Мясная продуктивность бычков герефордской породы при скормливании в рационах экструдированного корма. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2019;(2):148–150. URL: https://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_2_2019.pdf (дата обращения: 25.02.2025).
19. Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Мануйлов В.В. Оценка эффективности технологии получения зерновых хлопьев для производства комбикормов для молодняка крупного рогатого скота. *Кормопроизводство*. 2017;(6):33–38. <https://elibrary.ru/yuhlvv>
20. Курдоглян А.А., Миколайчик И.Н., Морозова Л.А., Дмитриева Ж.А. Использование плющеной зерносмеси при раздое коров. *Аграрный вестник Урала*. 2008;(4):46–48. <https://elibrary.ru/ijxcbv>
21. Остриков А.Н., Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Драган И.В. Технология микронизированных хлопьев для престартерных и стартерных комбикормов с использованием очищенного биогаза. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2020;(1):127–136. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.204>
22. Некрашевич В.Ф., Корнилов С.В., Воробьева И.В., Силушин П.А. Показатель для оценки достаточности микронизации зерна и определение его величины для пшеницы. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева*. 2013;(2):66–69. URL: https://vestnik.rgau.ru/archive/2_2013.pdf (дата обращения: 02.02.2025).
23. Киприянов Ф.А., Савиных П.А. Результаты исследования механизма и особенностей микронизации фуражного зерна. *Техника и оборудование для села*. 2024;(11):24–27. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-11-24-27>
24. Нечаев В.Н. Оптимизация настроечных параметров пассивного измельчителя при приготовлении ржаной патоки. *Агроинженерия*. 2023;25(3):41–48. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-41-48>

25. Алешкин А.В., Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Низовцев С.Л. Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(1):37–51. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>
26. Сысуев В.А., Савиных П.А., Казаков В.А., Сычугов Ю.В. Исследования и сравнительные испытания плющилки зерна с питающим устройством. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(2):207–221. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.207-221>

REFERENCES

1. Popov V.D., Mogilnitskiy V.M., Perekopskiy A.N., Shit I.S. [The Ways of Development of the Fodder Base in the North-Western Region of Russian]. *Technologii i technicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2001;(72):22–27. (In Russ.) <https://elibrary.ru/sztrhx>
2. Varasteh F., Ebrahimi S.H., Naserian A.A., Zerehdaran S., Miri V.H. Effect of Micronization and Meal Size of Corn Grain on Glycemic Response and in Vitro Hindgut Acidosis Potential in Horses. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2024;132:104982. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104982>
3. Sajjadi H., Ebrahimi S.H., Vakili S.A., Rohani A., Golzarian M.R., Miri V.H. Operational Conditions and Potential Benefits of Grains Micronization for Ruminant: A Review. *Animal Feed Science and Technology*. 2022;287:115285. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115285>
4. Kalantari R.K., Rouzbehan Y., Fazaali H., Direkvandi E., Salem A.Z.M. The Effect of Three Levels of Concentrate and Grain Processing on Feeding Behavior, Nutrient Digestibility, Blood Metabolites and Fecal pH of Turkmen Horses. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2021;104:103690. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2021.103690>
5. Sitnikov V.A., Yunusova O.Yu., Panyshv A.I., Popov A.N. Rations Digestibility in Milking Cows Depending on the Method of Feeding Concentrates Preparation. *Perm Agrarian Journal*. 2016;(1):64–69. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://agrovest.psaa.ru/wp-content/uploads/2017/09/agr_vest13.pdf (accessed 03.02.2025).
6. Mishurov N.P., Davydova S.A., Davydov A.A. Promising Technologies of Compound Feed's Quality Improving. *Journal of VNIIMZH*. 2019;(3):4–11. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/qlphlq>
7. Mishurov N.P., Davydova S.A., Davydov A.A. Innovative Methods of Heat Treatment of Compound Feed. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(3):2–7. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-3-2-7>
8. Blagov D.A., Mitrofanov S.V., Panfyorov N.S., Teterin V.S., Gapeeva N.N. The Effect of Physical Factors on Grain Feed Quality Characteristics. *Vsyo o myase*. 2021;(3):19–25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2021-3-19-25>
9. Belov A.A. Effect of the Microwave Treatment on Anti-Nutrients of Soybeans. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(4):386–393. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-627483>
10. Belov A.A. Effect of Microwave Treatment on Nutritional Factors of Soybeans. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;32–35. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-8-32-35>
11. Ivanova I.V., Kuznetsov A.F., Zenkov K.F., Mebonia E.G. Comparative Evaluation of the Effectiveness of Micronized Feed Supplements for Growing of Calves on Dairy Farms. *International Bulletin of Veterinary Medicine*. 2018;(4):88–93. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://spbguvu.ru/wp-content/uploads/2018/12/MBB-20184.pdf> (accessed 15.02.2025).
12. Bogdanovich I.V. Effect of Whole Corn Grain Included in the Diet of Prewaned Calves on Their Further Productivity and Increase of Digestibility of Feed Nutrients. *Zootechnical Science of Belarus*. 2023;58(1):160–171. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://zootech.belab.by/jour/article/view/1748> (accessed 15.02.2025).

13. Kamyab-Fard A., Yazdi M.H., Kazemi-Bonchenari M., Mahjoubi E. Inclusion of Whole Corn Grain in Forage-Free Starter Feeds in Holstein Dairy Calves: Determination of Optimum Level on Growth Performance, Rumen Fermentation, and Blood Metabolites. *Animal Feed Science and Technology*. 2023;304:115742. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115742>
14. Malekikhahi M., Ahmadizadeh M., Razzaghi A. Micronized Versus Super-Conditioned Corn: Effects on Starch Digestion, Performance, and Blood Metabolites of Holstein Dairy Calves. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(3):2381–2392. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24973>
15. Khiaosa-ard R., Czermak S., Hollmann M., Penagos-Tabares F., Sulyok M., Krska R., et al. Changes in Nutritional and Hygienic Quality Due to Storage of Common Native and Processed Grain Cereals Intended for Horse Feeding. *Journal of Stored Products Research*. 2024;106:102310. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102310>
16. Schwandt E.F., Hubbert M.E., Thomson D.U., Vahl C.I., Bartle S.J., Reinhardt C.D. A Survey of Starch Availability of Steam-Flaked Corn in Commercial Feedlots Evaluating Roll Size and Flake Density. *The Professional Animal Scientist*. 2016;32(5):550–560. <https://doi.org/10.15232/pas.2015-01496>
17. Pathiratne S.M., Shand P.J., Pickard M., Wanasundara J.P.D. Generating Functional Property Variation in Lentil (*Lens Culinaris*) Flour by Seed Micronization: Effects of Seed Moisture Level and Surface Temperature. *Food Research International*. 2015;76(1):122–131. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.026>
18. Morozova N.I., Musaev F.A., Morozov S.A., Shestavin A.Yu. Meat Efficiency of Bulls of the Hereford Breed During Farming in Extruded Fodder Rations. *The Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2019;(2):148–150. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_2_2019.pdf (accessed 25.02.2025).
19. Afanasev V.A., Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Frolova L.N., Manuylov V.V. Effectiveness of Grain Flake Technology in Complete Feed Production for Feeding Dairy Stores. *Kormoproizvodstvo*. 2017;(6):33–38. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/yuhlvv>
20. Kurdoglyan A.A., Mikolaychik I.N., Morozova L.A., Dmitrieva Zh.A. Use the Flattened Mix of Grains at Milking Cows. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2008;(4):46–48. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ijxcbv>
21. Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Frolova L.N., Dragan I.V. Technology of Micronized Cereals for Prestarter, Starter Mixed Fodder with the Use of Purified Biogas. *Storage and Processing of Farm Products*. 2020;(1):127–136. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.204>
22. Nekrashevich V.F., Kornilov S.V., Vorobyeva I.V., Silushin P.A. Index for Evaluating Grain Micronization Sufficiency and Estimating its Size for Wheat. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev*. 2013;(2):66–69. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://vestnik.rgatu.ru/archive/2_2013.pdf (accessed 02.02.2025).
23. Kipriyanov F.A., Savinykh P.A. The Results of the Study of the Mechanism and Features of Micronization of the Feed Grain. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;(11):24–27. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-11-24-27>
24. Nechaev V.N. Optimising the Setting Parameters of a Passive Grinder used for Rye Molasses Preparation. *Agricultural Engineering*. 2023;25(3):41–48. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-41-48>
25. Aleshkin A.V., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovtsev S.L. Substantiation of the Structural and Technological Parameters of the Working Body of the Milling Grain Shredder. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):37–51. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>
26. Sysuev V.A., Savinykh P.A., Kazakov V.A., Sychugov Yu.V. Research and Comparative Testing of a Grain Flatteners with a Feeding Device. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):207–221. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.207-221>

Об авторах:

Киприянов Федор Александрович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5974-4934>, SPIN-код: 8937-8109, Scopus ID: 57210311726, Researcher ID: ADI-1364-2022, kipriyanovfa@bk.ru

Савиных Петр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5668-8479>, Researcher ID: V-6933-2017, Scopus ID: 56728791200, peter.savinyh@mail.ru

Вклад авторов:

Ф. А. Киприянов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение сбора данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования.

П. А. Савиных – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение сбора данных; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 21.02.2025; поступила после рецензирования 28.07.2025;
принята к публикации 11.08.2025*

About the authors:

Fedor A. Kipriyanov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5974-4934>, SPIN-code: 8937-8109, Scopus ID: 57210311726, Researcher ID: ADI-1364-2022, kipriyanovfa@bk.ru

Petr A. Savinykh, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5668-8479>, Researcher ID: V-6933-2017, Scopus ID: 56728791200, peter.savinyh@mail.ru

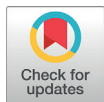
Authors contribution:

F. A. Kipriyanov – conducting the study, including data collection; preparing the manuscript: visualizing the study research results.

P. A. Savinykh – conducting the study, including data collection; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, making comments and corrections by members of the research team, including at the stages before and after publication.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 21.02.2025; revised 28.07.2025; accepted 11.08.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.678-699>EDN: <https://elibrary.ru/mdwymg>

УДК / UDK 004.89:547.979.7

Оригинальная статья / Original article

**Оценка содержания хлорофилла по оптической
плотности листьев растений с использованием
машинного обучения****С. А. Ракутько¹✉, Е. Н. Ракутько¹, Ц. Су²**¹ *Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства –
филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,**Санкт-Петербург, Российская Федерация*² *Исследовательский институт оборудования
для сельского хозяйства Академии сельскохозяйственных наук
Синьцзян-Уйгурского автономного района,
Урумчи, Китайская Народная Республика*✉ sergej1964@yandex.ru**Аннотация**

Введение. Хлорофилл играет важную роль в абсорбции и трансформации световой энергии в химическую и обеспечивает производство органического вещества в растениях. Мониторинг содержания хлорофилла позволяет оценить взаимодействие растений с окружающей средой, степень влияния стресс-факторов, что важно для управления урожаем. Традиционные лабораторные методы анализа подразумевают разрушение образца, требуют много времени и не подходят для быстрых полевых оценок. Более удобным для этих целей представляется применение недорогих, портативных приборов.

Цель исследования. Разработать структуру искусственной нейронной сети и ее машинное обучение для предсказания содержания хлорофилла в листьях растений по их оптической плотности в отдельных диапазонах видимого спектра.

Материалы и методы. Датасет для искусственной нейронной сети формировали из экспериментальных данных, полученных с помощью денситометра ДП-1М и хлорофиллметра ССМ-200. Измерения проводили для листьев растений салата, перца, томата, кабачка в различных возрастных состояниях и при различных параметрах световой среды. Обучение искусственной нейронной сети проводилось в среде Google Colab с последующей адаптацией модели для использования в микроконтроллерном устройстве – листовом фотоколориметре.

Результаты исследования. В сформированном датасете размером 1 000 записей оптическая плотность листьев варьируется в красной области от 0,57 до 2,54, зеленой – от 0,9 до 1,66, синей – от 1,09 до 3,53 отн. ед. Соответственно этим комбинациям содержание хлорофилла меняется от 3,1 до 156,5 отн. ед. Наиболее точной из шести различных структур сети, отличающихся количеством нейронов в скрытых слоях, оказалась структура «32:32», обеспечивающая низкий уровень средней абсолютной ошибки MAE = 6,64 отн. ед., среднюю ошибку предсказаний MAPE = 16,34 % и высокий

© Ракутько С. А., Ракутько Е. Н., Су Ц., 2025

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

коэффициент детерминации $R^2 = 0,8886$. Для упрощения модели и экономии ресурсов микроконтроллера была выбрана структура «4:4». Она позволила сохранить невысокий уровень MAE = 6,83 %, MAPE = 16,86 % при $R^2 = 0,8808$ и значительно меньшем объеме используемых ресурсов – 41 весовой параметр и 164 байта памяти. Сравнительная оценка с классическими алгоритмами машинного обучения показала превосходство разработанной модели по всем метрикам.

Обсуждение и заключение. Для практического использования обученная искусственная нейронная сеть перенесена в микроконтроллер разработанного ранее листового фотоколориметра, имеющего все необходимые аппаратные средства для измерения оптической плотности листа в отдельных спектральных диапазонах. Разработанная модель позволяет реализовать неразрушающий и оперативный контроль состояния растений, что особенно важно в системах точного земледелия. Разработка имеет большой потенциал для практического применения в системах экологического мониторинга и поддержки принятия решений в сельском хозяйстве. Результаты исследования подтверждают целесообразность использования машинного обучения для повышения эффективности методов оценки состояния растений и формирования цифровых решений в агротехнологиях.

Ключевые слова: светокультура, лист растения, содержание хлорофилла, оптическая плотность, искусственная нейронная сеть, машинное обучение

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (тема № FGUN-2025-0010 «Разработать энерго-ресурсосберегающие машинные технологии и цифровые системы мониторинга и управления для экологически безопасного производства сельскохозяйственной продукции»), в части создания прототипа цифрового средства для экологического мониторинга), 2025 г.

Благодарности: авторы благодарят своих коллег: старшего научного сотрудника А. П. Мишанова за кропотливую работу по созданию условий для роста растений и помощь в проведении первичных измерений; кандидата сельскохозяйственных наук А. Е. Маркову за подготовку экспериментального материала, а также рецензентов за их вклад в экспертную оценку работы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Су Ц. Оценка содержания хлорофилла по оптической плотности листьев растений с использованием машинного обучения. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):678–699. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.678-699>

Estimating Chlorophyll Content by Optical Density of Plant Leaves Using Machine Learning

S. A. Rakutko^a✉, Ye. N. Rakutko^a, J. Su^b

^a Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation

^b Research Institute of Agricultural Equipment, Academy of Agricultural Sciences, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, People's Republic of China

✉ sergej1964@yandex.ru

Abstract

Introduction. Chlorophyll plays a crucial role in absorbing and transforming light energy into a chemical form that provides organic matter production in plants. Monitoring of chlorophyll content helps to assess plant-environment interactions and the degree of influence

of stress factors that are essential for yield management. Traditional laboratory methods of analyzing are time-consuming, destroying samples and unsuitable for rapid field evaluations. A more reasonable solution is to use low-cost, portable devices.

Aim of the Study. The study is aimed at developing and training an ANN architecture to predict the chlorophyll content in plant leaves based on their optical density within specific visible spectrum ranges.

Materials and Methods. The artificial neural network dataset was compiled from experimental measurements using the DP-1M densitometer and the CCM-200 chlorophyll meter. Data were collected from lettuce, pepper, tomato and zucchini leaves of different ages, which were grown in different light environments. The artificial neural network training was carried out in the Google Colab environment with subsequent adaptation of the model for using in a microcontroller device – a photocolimeter for leaves.

Results. The dataset with 1,000 entries showed that the leaf optical density range is from 0.57 to 2.54 relative units (red), from 0.9 to 1.66 relative units (green), and from 1.09 to 3.53 relative units (blue). According to these data, the chlorophyll content variations are from 3.1 to 156.5 relative units. In the study, there were compared six artificial neural network architectures that differed by hidden-layer neurons. The structure “32:32” had the highest accuracy (MAE = 6.64 rel. units, MAPE = 16.34%, $R^2 = 0.8886$). A simplified structure “4:4” was selected to simplify the model and improve the microcontroller efficiency. This structure maintained the performance (MAE = 6.83 rel. units, MAPE = 16.86%, $R^2 = 0.8808$) with much smaller amount of resources used – 41 weight parameters and 164 bytes of memory. A comparative evaluation with classical machine learning algorithms demonstrated the superiority of the developed model across all metrics.

Discussion and Conclusion. The trained artificial neural network was implemented on a microcontroller-based photocolimeter for leaves that enabled the non-destructing optical density measurements.

The developed model allows implementing non-destructing and operational monitoring of the condition of plants, which is especially important in precision farming systems. This approach has significant potential for ecological monitoring and precision agriculture. The study results demonstrate the viability of machine learning for improving plant status assessment and developing digital agrotechnology solutions.

Keywords: plant lighting, plant leaf, chlorophyll content, optical density, artificial neural network, machine learning

Funding: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the State Assignment of the Federal Scientific Center for VIM (No. FGUN-2025-0010 “Develop energy- and resource-saving machine technologies and digital monitoring and control systems for environmentally friendly agricultural production”, specifically for the creation of a prototype digital environmental monitoring tool), 2025.

Acknowledgments: The authors thank their colleagues: Senior Researcher A. P. Mishanov for their meticulous work in creating conditions for plant growth and assistance with initial measurements; Candidate of Agricultural Sciences A. E. Markova for preparing the experimental material; and the reviewers for their contribution to the peer review of the work.

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

For citation: Rakutko S.A., Rakutko Ye.N., Su J. Estimating Chlorophyll Content by Optical Density of Plant Leaves Using Machine Learning. Engineering Technologies and Systems. 2025;35(4):678–699. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.678-699>

ВВЕДЕНИЕ

Хлорофилл, являясь ключевым пигментом фотосинтеза, играет центральную роль в преобразовании световой энергии в химическую, обеспечивая синтез органических веществ в растениях. Его концентрация и соотношение форм напрямую зависят от множества факторов: биотических (наличие вредителей или болезней), генетических особенностей вида растений, фазы их роста, условий окружающей среды, таких как уровень освещенности, влажность почвы,

ее плодородие и засоленность. В связи с этим мониторинг содержания хлорофилла (*CC – Chlorophyll Content*) в листьях растений представляет собой важный инструмент для оценки физиологического состояния растений, их реакции на внешние воздействия и эффективности фотосинтетических процессов. Такая информация критически важна как для научных исследований в области физиологии растений, так и для практического применения в сельском хозяйстве, особенно в контексте точного земледелия и экологического мониторинга.

Традиционные методы определения *CC*, основанные на лабораторном анализе экстрактов из листьев, связанные с разрушением образца, требуют значительных временных затрат и сложной подготовки проб [1]. В связи с такими ограничениями традиционные подходы становятся непригодными для оперативной и массовой диагностики состояния растений в полевых условиях. В последние годы все большее внимание уделяется разработке и внедрению неразрушающих, быстрых и экономически эффективных методов анализа, основанных на спектрофотометрии и машинном обучении (*ML – Machine Learning*) [2]. Однако применение таких методов создает ряд проблем, связанный с необходимостью повышения точности измерений, устойчивости к влиянию внешних факторов и адаптации к различным видам растений. Гиперспектральные данные имеют потенциал, однако в качестве недостатка выделяется избыточность [3].

Особый интерес вызывает интеграция спектральных измерений с алгоритмами машинного обучения, которая позволяет создавать прогнозные модели для оценки *CC* по данным оптической плотности листьев. Подходы, основанные на искусственных нейронных сетях (ИНС), показали свою перспективность в обработке нелинейных зависимостей и адаптации к изменяющимся условиям. Тем не менее, существующие решения часто требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их использование в портативных устройствах [4]. Также остается недостаточно изученной возможность минимизации ошибок предсказания в широком диапазоне концентраций хлорофилла и при различных условиях освещения.

Целью данной работы является обоснование структуры ИНС и ее обучение для прогнозирования *CC* в листьях растений на основе данных об оптической плотности в отдельных диапазонах видимого спектра.

Задачи исследования:

- сформировать датасет на основе экспериментальных данных измерений оптической плотности листьев в синем, зеленом и красном спектральных диапазонах и соответствующих значений содержания хлорофилла;
- провести сравнительный анализ различных архитектур искусственной нейронной сети для выявления оптимальной структуры, обеспечивающей высокую точность прогноза;
- оценить точность и сходимость выбранной модели с использованием метрик MAE, MAPE и R^2 ;
- провести сравнительную оценку точности разработанной нейросетевой модели с классическими алгоритмами машинного обучения (множественная линейная регрессия, метод опорных векторов, случайный лес);

– адаптировать и реализовать выбранную модель искусственной нейронной сети в микроконтроллере портативного измерительного устройства – листового фотокolorиметра.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Разработка оперативного, неразрушающего метода оценки *СС* является важной задачей. Традиционно для изучения содержания фотосинтетических пигментов применяют спектрофотометрический метод, который основан на изучении спектра поглощения их экстрактов из листа растения. Этот метод позволяет одновременно определить содержание различных пигментов без предварительного разделения компонентов. Однако у спектрофотометрии есть ограничения: она трудоемкая, требует много времени и быстрой обработки образцов (так как пигменты быстро разрушаются), предусматривает уничтожение образцов, что препятствует динамическому наблюдению за изменениями в одних и тех же экземплярах, а также затрудняет работу с редкими видами. Эти проблемы преодолеваются с помощью бесконтактных методов оценки содержания фотосинтетических пигментов в листе непосредственно на растении с помощью портативных приборов. В живом листе у хлорофиллов более широкий и выровненный спектр поглощения, чем в растворах. Это связано с тем, что в живом листе химическая структура молекулы хлорофилла отличается от выделенного хлорофилла за счет влияния липопротеидного комплекса хлоропластов, в который они встроены¹.

Развитие дистанционных (аэрокосмических) методов значительно увеличило возможности изучения и оценки природных ресурсов по значениям вегетационных индексов, повысило качество исследований, объективность получаемых результатов, сократило временные и финансовые затраты [5]. В последние годы жизнеспособным решением для получения данных *СС* при мониторинге сельскохозяйственных культур и развитии точного земледелия стало гиперспектральное дистанционное зондирование [6]. Дистанционное зондирование, использующее спектры отражения растительности и вегетационные индексы, позволяет провести быстрое, эффективное, неразрушающее определение различных морфологических и биохимических признаков растений, в том числе *СС* [7]. Для быстрого мониторинга физиологического состояния растений по *СС* в различные фазы роста используются данные гиперспектральной отражательной способности листьев [8]. Показано, что объединение гиперспектральных данных дистанционного зондирования и алгоритмов *ML* может быть эффективным для оценки свойств растительности по *СС* [9].

Интеграция спектральных методов предварительной обработки с алгоритмами машинного обучения доказала свою ценность при оценке сезонной изменчивости *СС*. Этот подход широко применяется в точном земледелии и фенотипировании сельскохозяйственных культур [10]. Для оценки состояния растений разработаны различные методы прогнозирования *СС*: вегетационные индексы на основе отражения

¹ Белов М.Л., Федотов Ю.В., Булло О.А., Городничев В.А. Лазерная флуоресцентная диагностика состояния растений. М.: Московский государственный технический университет им. Баумана; 2017. 56 с.

в зеленой, красной и ближней инфракрасной областях спектра; модели на основе спектральных параметров; *ML* [11]. Методы *ML* приобрели известность благодаря их применению в построении прогностических моделей для признаков растений с использованием спектральной отражательной способности. Эти методы показали заметные улучшения в точности прогнозирования и надежности моделей [12]. Подходы на основе компьютерного зрения и *ML* позволяют быстро и точно производить оценку *СС* в масштабах селекционных программ, что критически важно для точного земледелия и ускоренной селекции устойчивых сортов [13]. Комбинация гиперспектральной визуализации и *ML* позволяет повысить точность оценки *СС* за счет анализа высокоразмерных данных, автоматизировать мониторинг стресса и питания растений, масштабировать решения для крупных сельхозугодий. Спектроскопия и *ML* открывают новые возможности для точного, неразрушающего и экономичного мониторинга состояния выращиваемых растений, что критически важно для устойчивого сельского хозяйства и повышения урожайности [14].

Интеллектуальные системы мониторинга и управления на основе *ML* преобразуют традиционное сельское хозяйство в высокоточное, основанное на данных. Эти технологии позволяют в реальном времени отслеживать состояние растений и окружающей среды, обеспечивая точное орошение, удобрение и защиту от вредителей. Получаемые спектрофотометрическим методом кривые поглощения позволяют выделить из общей кривой поглощения информацию о концентрации отдельных пигментов [15]. Современные методы *ML* помогают своевременно диагностировать болезни растений, используя данные о *СС* и другие показатели. Это ускоряет реакцию на угрозы и улучшает здоровье посевов. Благодаря таким технологиям аграрии получают эффективные инструменты для контроля над состоянием растений, повышая производительность и снижая затраты ресурсов [16].

В настоящее время применяются различные приборы, такие как SPAD-502, CL-01, CCM-200, atLEAF+, позволяющие оперативно оценивать относительные концентрации пигментов без повреждения растений. Эти устройства основаны на измерении поглощения света хлорофиллом на специфических длинах волн, при этом контроль осуществляется в инфракрасной области спектра, где поглощение минимальное, что компенсирует различия в толщине листа [17; 18]. Так, в экспериментах с томатом было установлено, что наибольшее влияние на *СС* оказывал уровень облученности (68 % вклад в общую вариацию), затем следовал фотопериод (15,1 %) и положение листа в кроне растения (5,7 %). В одном из экспериментов спектральный состав незначительно влиял на *СС* [19]. В другом эксперименте *СС* оказалось чувствительным к уровню освещенности и спектральному составу света. Исследование показало, что измерение *СС* дает возможность объективно оценивать качественные изменения в растениях, происходящих под воздействием различных факторов световой среды [20].

В научных исследованиях и практической деятельности к настоящему времени широкое распространение получили ИНС [21]. Нейросетевые технологии применяются для мониторинга состояния растений как биологических объектов, распознавания и классификации признаков дефицита питательных элементов по изображению листьев [22], оптимизации микроклимата умных теплиц [23], для

определения биомассы растений по визуальному состоянию [24] и выявления заболеваний растений [25].

Предлагаемое нами техническое решение – комбинация нейросетевых методов прогноза *СС* по оптической плотности листа в отдельных спектральных диапазонах и использование обученной нейросети в портативном приборе – устраняет выявленные недостатки различных подходов и позволяет получать качественные результаты измерения *СС* в полевых условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы экспериментальные данные, полученные в лаборатории энергоэкологии светокультуры в ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в течение 2015–2022 гг. В данный период в лаборатории исследовали оптические свойства листьев салата, перца, томата, кабачка в различных возрастных состояниях и при различных параметрах световой среды [26]. Размер объединенного датасета составлял 1 000 записей.

Для определения реальных значений *СС* в листе использовали прибор ССМ-200 (рис. 1), принцип действия которого основан на нахождении отношения оптических плотностей листа на длинах волны 931 нм (используется для компенсации влияния толщины листа) и 653 нм (зависит от концентрации хлорофилла) [27]. Для определения оптической плотности листьев растений использовали денситометр ДП-1М (рис. 2) [28]. Использовали светофильтры группы *A*, с помощью которых определяли оптическую плотность листа в синем *B* (421–467 нм), зеленом *G* (511–562 нм) и красном *R* (607–676 нм) диапазонах.



Р и с. 1. Измеритель содержания хлорофилла ССМ-200

F i g. 1. Chlorophyll content meter CCM-200



Р и с. 2. Определение оптической плотности листьев на приборе ДП-1М

F i g. 2. Determining the leaf optical density by the device DP-1M

Источник: фотографии 1, 2, 4 сделаны Е. Н. Ракутько при проведении измерений в лаборатории энергоэкологии светокультуры ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2015–2025 гг.

Source: photos 1, 2, 4 were taken by Ye. N. Rakutko during the measurements in the Laboratory of Energy and Ecology Efficiency of Plant Lighting in IEEP in 2015–2025.

На рисунке 3 представлено соотношение спектров поглощения хлорофиллов (*a* и *b*) и пропускания применяемых в денситометре светофильтров. В синем

и красном спектральных диапазонах полосы пропускания соответствующих светофильтров перекрываются с основными пиками поглощения хлорофиллов, что предоставляет возможность оценить их концентрацию по оптическим плотностям листа D_B и D_R в этих диапазонах. В зеленом диапазоне отсутствуют характерные пики поглощения хлорофиллов. Применение зеленого светофильтра по оптической плотности D_G позволяет косвенно учесть другие параметры листа, не связанные с пигментами, например, его толщину. Такие спектральные соотношения дают основание полагать, что по оптической плотности листьев возможна комплексная оценка CC в них.

В качестве цифрового средства для экологического мониторинга, использующего обученную нейронную сеть для получения численных значений CC в листе растения, был взят листовой фотоколориметр, имеющий все необходимые аппаратные средства для измерения оптической плотности листа в отдельных спектральных диапазонах (рис. 4) [29]. Программное обеспечение микроконтроллера устройства реализует алгоритм предсказания CC по измеренным значениям оптической плотности листа.

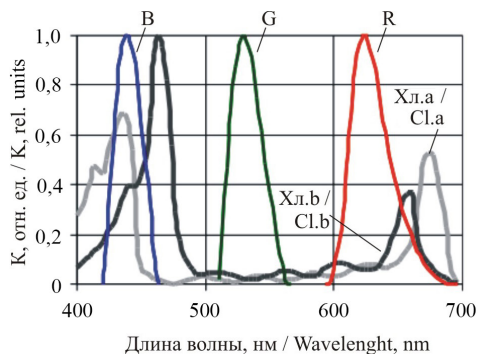


Рис. 3. Спектры поглощения хлорофиллов и пропускания светофильтров листового фотоколориметра

Fig. 3. Absorption spectra of chlorophylls and transmittance of light filters of a photocolorimeter leaves



Р и с. 4. Использование листового фотоколориметра для прогнозирования CC в листьях

Fig. 4. Using a photocolorimeter for leaves to predict leaf CC

Примечание: B – кривая пропускания синего светофильтра; G – кривая пропускания зеленого светофильтра; R – кривая пропускания красного светофильтра; $Хл.а$ – спектр поглощения хлорофилла a ; $Хл.б$ – спектр поглощения хлорофилла b .

Note: B – blue filter transmission curve; G – green filter transmission curve; R – red filter transmission curve; $Chl.a$ – chlorophyll a absorption spectrum; $Chl.b$ – chlorophyll b absorption spectrum.

Источник: рисунки 3, 5–10 составлены авторами статьи.

Source: figures 3, 5–10 are compiled by the authors of the article.

Произведены эксперименты со структурой ИНС путем изменения гиперпараметров в коде (количества нейронов в скрытых слоях). На рисунке 5 показана структура сети с двумя скрытыми слоями по четыре нейрона в каждом.

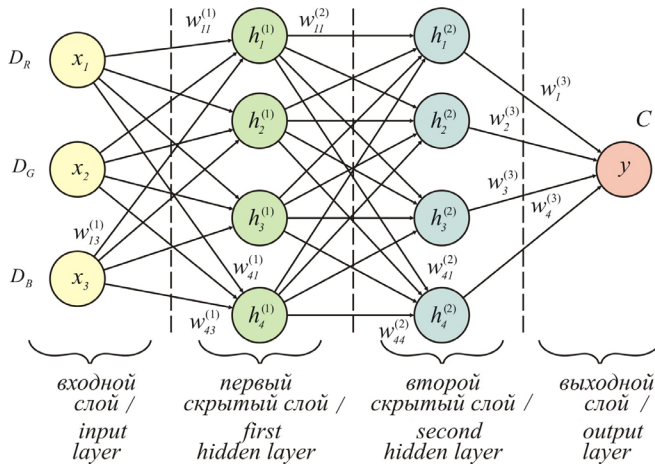


Рис. 5. Структура искусственной нейронной сети

Fig. 5. Structure of an artificial neural network

Примечание: D_R , D_G , D_B – оптическая плотность листа соответственно в красном, зеленом и синем диапазоне; x_1 , x_2 , x_3 – входные признаки; $h_1^{(1)}$, $h_2^{(1)}$, $h_3^{(1)}$, $h_4^{(1)}$ – выходные сигналы нейронов первого скрытого слоя; $h_1^{(2)}$, $h_2^{(2)}$, $h_3^{(2)}$, $h_4^{(2)}$ – выходные сигналы нейронов второго скрытого слоя; y – целевая переменная; C – прогноз содержания хлорофилла; $W_{11}^{(1)}$, $W_{13}^{(1)}$, $W_{41}^{(1)}$, $W_{43}^{(1)}$ – весовые коэффициенты нейронов первого слоя; $W_{11}^{(2)}$, $W_{41}^{(2)}$, $W_{44}^{(2)}$ – весовые коэффициенты нейронов второго слоя; $W_1^{(3)}$, $W_2^{(3)}$, $W_3^{(3)}$, $W_4^{(3)}$ – весовые коэффициенты нейронов выходного слоя.

Note: D_R , D_G , D_B – leaf optical density in the red, green, and blue spectral ranges, respectively; x_1 , x_2 , x_3 – input features; $h_1^{(1)}$, $h_2^{(1)}$, $h_3^{(1)}$, $h_4^{(1)}$ – output signals of the neurons in the first hidden layer; $h_1^{(2)}$, $h_2^{(2)}$, $h_3^{(2)}$, $h_4^{(2)}$ – output signals of the neurons in the second hidden layer; y – target variable; C – predicted chlorophyll content; $W_{11}^{(1)}$, $W_{13}^{(1)}$, $W_{41}^{(1)}$, $W_{43}^{(1)}$ – weight coefficients of the first layer neurons; $W_{11}^{(2)}$, $W_{41}^{(2)}$, $W_{44}^{(2)}$ – weight coefficients of the second layer neurons; $W_1^{(3)}$, $W_2^{(3)}$, $W_3^{(3)}$, $W_4^{(3)}$ – weight coefficients of the output layer neurons.

Результатом обучения сети являются матрицы весов между входным и первым скрытым слоем $W^{(1)}$, между первым и вторым скрытыми слоями $W^{(2)}$, между вторым скрытым и выходным слоем $W^{(3)}$, смещений (*bias*) для нейронов соответствующих слоев $B^{(1)}$, $B^{(2)}$ и $B^{(3)}$ (на структуре не показаны). При переносе значений матриц в микропроцессорное устройство, аппаратно измеряющее элементы входного вектора X , программно реализуются вычисления:

$$h^{(1)} = \sigma(W^{(1)}X + B^{(1)}); \quad h^{(2)} = \sigma(W^{(2)}h^{(1)} + B^{(2)}); \quad y = \sigma_{out}(W^{(3)}h^{(2)} + B^{(3)}),$$

где σ , σ_{out} – соответствующие функции активации.

Вычисленное значение y представляет собой предсказание CC , соответствующее измеренным значениям оптической плотности листа D_R , D_G и D_B .

Каждый слой линейного стека имеет один входной и один выходной тензор. Скрытые слои полносвязные. Для придания нелинейности модели применена функция активации *ReLU* (*Rectified Linear Unit*). Выходной слой содержит один нейрон, так как предсказывается одно значение CC (C_i^{pred}) без функции активации. Применяется оптимизатор *Adam*, который учитывает предыдущие градиенты для

ускорения сходимости, адаптивно настраивает скорости обучения для каждого параметра и хорошо работает с регрессией. Для обучения и оценки моделей исходный датасет был случайным образом разделен на обучающую и тестовую (валидационную) выборки в соотношении 80/20. Таким образом, для обучения модели использовалось 800 примеров, а для независимой проверки ее обобщающей способности 200 примеров. Перед разделением данные были перемешаны для обеспечения репрезентативности распределения целевой переменной (содержания хлорофилла) в обеих выборках. Данный прием позволил избежать переобучения и получить объективную оценку производительности модели на новых, не участвовавших в обучении данных.

Задавали 100 эпох – итераций полного прохода по всем обучающим данным. С помощью метрики средней абсолютной ошибки (MAE – *Mean Absolute Error*) определяли насколько в среднем (по n примерам в тестовом наборе) предсказания C_i^{pred} отличаются от реальных значений C_i^{true} . Особенности MAE : линейная чувствительность к ошибкам, более легкая интерпретируемость (это средняя абсолютная ошибка в единицах целевой переменной), меньшая чувствительность к выбросам.

В качестве функции потерь приняли среднюю квадратичную ошибку (MSE – *Mean Squared Error*). Особенности принятой функции потерь MSE : сильно штрафует большие ошибки (квадратичная зависимость), оптимальна для задач регрессии с нормальным распределением ошибок, чувствительна к выбросам. Вычисляли среднюю ошибку предсказаний ($MAPE$ – *Mean Absolute Percentage Error*). Разброс данных характеризовали стандартным отклонением (SD).

Предварительная обработка и визуализация данных велась в Excel. Для построения и обучения ИНС использовалась облачная среда Google Colab, предоставляющая бесплатный доступ к вычислительным ресурсам (GPU/TPU).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 6 показана связь CC и оптической плотности листьев в отдельных спектральных диапазонах (по результатам измерений).

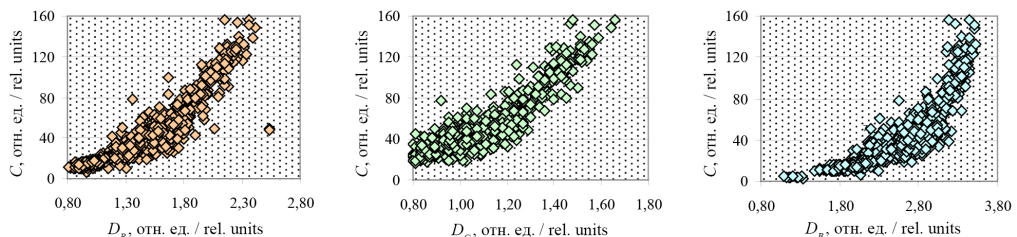


Рис. 6. Связь CC (C) и оптической плотности листа в красном D_R , синем D_G и зеленом D_B диапазонах

Fig. 6. Relationship between CC (C) and leaf optical density in red D_R , green D_G and blue D_B ranges, relative units

Анализ первичной информации об оптической плотности листьев в отдельных спектральных диапазонах и соответствующих им значениям CC позволил выявить следующие закономерности.

Экспериментальные данные свидетельствуют о нелинейной связи CC и оптической плотности листа в разных спектральных диапазонах. Эта нелинейность обусловлена природой взаимодействия света с веществом листа, включающей поглощение и рассеивание электромагнитного излучения пигментами. Особенно ярко проявляется нелинейность в красной области спектра (рис. 3).

Оптическая плотность листьев в красной области D_R варьируется от 0,57 до 2,54 ($SD = 0,35$), зеленой D_G от 0,9 до 1,66 ($SD = 0,24$), синей D_B от 1,09 до 3,53 ($SD = 0,47$) отн. ед. Соответственно этим комбинациям значение C меняется от 3,1 до 156,5 ($SD = 28,89$) отн. ед. Такой широкий диапазон вызван различной толщиной листа, неоднородностью его строения, различиями в составе клеточной стенки, плотности тканей и распределением пигментов у различных растений, использованных в эксперименте.

Результаты экспериментов со структурой ИНС, при которых изменяли количество скрытых слоев, сведены в таблицу 1. Помимо рассмотренных выше метрик, таблица содержит количество весов нейронов N (включая нейроны смещения), а также размер необходимой памяти V (при сохранении весов в формате *float*).

Для демонстрации эффективности предложенного подхода с ИНС была проведена сравнительная оценка с рядом классических алгоритмов машинного обучения. В качестве альтернативных моделей выбраны множественная линейная регрессия (*Linear Regression*), метод опорных векторов для регрессии (*SVR – Support Vector Regression*) и алгоритм ансамблевого обучения – случайный лес (*Random Forest*). Все модели обучались и тестировались на одном и том же разделенном наборе данных. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Показатели искусственной нейронной сети с различной структурой скрытых слоев
Performance of artificial neural network with different hidden layer structure

Структура / Structure	MAE , отн. ед. / rel. units	R^2 , отн. ед. / rel. units	$MAPE$, %	N , шт. / number	V , байт / bytes
64:64	6,75	0,8862	17,02	4 481	17 924
32:32	6,64	0,8886	16,34	1 217	4 868
16:16	6,71	0,8867	17,05	353	1 412
8:8	6,80	0,8837	17,14	113	452
4:4	6,83	0,8808	16,86	41	164
4:0	8,21	0,8508	21,68	21	84

Из таблицы 2 видно, что предложенная ИНС с архитектурой «4:4» превзошла все сравниваемые модели по всем метрикам, показав наименьшую среднюю абсолютную ошибку (MAE) и среднюю абсолютную процентную ошибку ($MAPE$), а также наибольший коэффициент детерминации (R^2). Это свидетельствует о ее способности эффективнее улавливать нелинейные взаимосвязи между оптической плотностью и содержанием хлорофилла по сравнению с линейными и ансамблевыми методами.

**Сравнительный анализ моделей машинного обучения
для прогнозирования содержания хлорофилла**
Comparative analysis of machine learning models for chlorophyll content prediction

Модель / model	MAE , отн. ед. / rel. units	R^2 , отн. ед. / rel. units	$MAPE$, %
Множественная линейная регрессия / Linear Regression	12,45	0,7215	28,91
Случайный лес / Random Forest	8,03	0,8612	19,54
Метод опорных векторов / Support Vector Regression	9,87	0,8103	23,12
ИНС 4:4 / ANN 4:4	6,83	0,8808	16,86

На рисунке 7 представлены графики обучающих и валидационных потерь при работе ИНС, построенные в следующих координатах: ось X – номер эпохи; ось Y – значение функции потерь MSE . Графики показывают динамику изменения ошибки модели в процессе обучения.

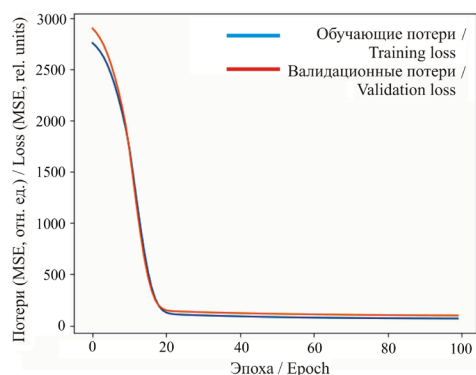
Смоделировано шесть конфигураций ИНС, начиная от глубокой сети с двумя скрытыми слоями по 64 нейрона («64:64» согласно таблице) и заканчивая простой однослойной сетью с четырьмя нейронами («4:0»). Все сети имеют три входных и один выходной признак. Средняя абсолютная ошибка $MAE = 6,64$ отн. ед. достигает минимума при архитектуре «32:32». При этом средняя относительная ошибка $MAPE = 16,34$ % наименьшая, коэффициент детерминации $R^2 = 0,8886$ максимален. Хуже себя проявляет самый простой вариант с одним скрытым слоем из четырех нейронов («4:0»), где $MAE = 8,21$ отн. ед., $R^2 = 0,8508$, $MAPE = 21,68$ %.

Количество параметров (весов) N непосредственно зависит от количества нейронов в структуре. Чем меньше нейронов, тем меньше параметров хранится в памяти микроконтроллера. Модель «4:0» содержит минимум параметров (всего 21 вес), тогда как сеть «64:64» насчитывает почти в 213 раз больше (4 481 вес). Для хранения параметров сети «4:0» требуется всего 84 байта, тогда как для сети «64:64» требуется 17 924 байт.

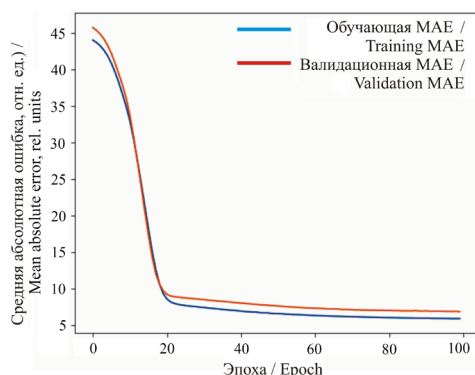
Наиболее сбалансированная комбинация ошибок и сложности наблюдается при структуре «32:32». Следующая структура по критерию меньшего значения $MAPE$ – сеть «4:4». Ее $MAPE$ всего на 0,52 %, а MAE на 0,19 % выше, чем у структуры «32:32». Однако она существенно менее требовательна по объему требуемой памяти, что может быть критично для применения сети в простых микроконтроллерах типа Arduino.

Для реализации на микропроцессорном устройстве остановились на структуре ИНС «4:4». Графики обучающих и валидационных потерь показывают, что после 20-й эпохи потери резко уменьшились примерно с 3 000 до 200 отн. ед. Такое поведение характерно для большинства нейронных сетей, где начальная случайная инициализация весов постепенно приближается к оптимальному решению. Высокие начальные значения потерь связаны с большим расхождением начальных предсказаний модели и реальных данных, которое быстро исправляется процессом обучения. Тот факт, что графики потерь на тренировочном и контрольном наборах практически совпадают и остаются близкими друг другу на протяжении всей процедуры обучения, свидетельствует о хорошем поведении модели. Значительно

более высокие потери указывают на переобучение модели, но в данном случае разницы практически нет, значит, модель успешно экстраполирует знания на новые данные. Параллельный ход обоих графиков вдоль горизонтальной оси означает, что дальнейшее обучение практически не улучшает результаты. Оптимизатор уже находится в точке локального минимума, модель достигает своего предела обобщаемости на предоставленном наборе данных. Дальнейшее уменьшение потерь маловероятно без существенного улучшения архитектуры или увеличения набора данных.



Р и с. 7. Обучающая и валидационная потери
F i g. 7. Training and validation loss



Р и с. 8. Обучающая и валидационная ошибки
F i g. 8. Training and validation MAE

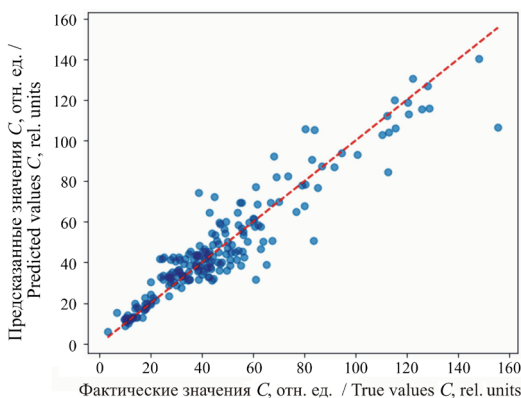
На рисунке 8 представлены графики обучающей и валидационной ошибки. Средняя абсолютная ошибка $MAE = 6,83$ отн. ед.

Динамика средних абсолютных ошибок повторяет картину, рассмотренную выше для среднеквадратичной ошибки. Начальное падение MAE аналогично снижению MSE , демонстрирует стремительное улучшение предсказательных способностей модели в первые этапы обучения. Такая динамика связана с постепенным выходом из начальной хаотичности в сторону оптимального положения весов сети и ее способности хорошо обобщаться на неизвестные данные. Небольшое устойчивое снижение MAE после первого этапа обучения свидетельствует о медленном продвижении к лучшему состоянию. Здесь возможна остановка процесса обучения раньше, если расходы на ресурсы превышают пользу от небольших улучшений. Данные графики дополняют предыдущий анализ и укрепляют уверенность в достигнутом результате.

На рисунке 9 фактические значения (*True Values*) сопоставляются с предсказанными (*Predicted Values*). Рассмотрение графика сопоставления истинных значений CC и предсказанных моделью дает важные сведения о точности и надежности разработанной модели. Большая часть точек расположена вблизи диагональной прямой, что свидетельствует о хорошем совпадении предсказанных значений с реальными. Чем ближе точка к диагонали, тем точнее работа модели. Скопление точек в нижней части графика (первая треть диапазона изменения CC) указывает на лучшее качество предсказаний для образцов с низким уровнем

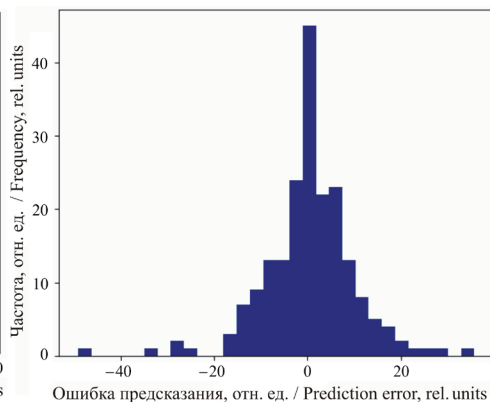
хлорофилла. Вместе с анализом первичных данных (рис. 6) это свидетельствует о том, что листья с низким CC были представлены в большем количестве в исходном наборе данных или имели большую однородность, облегчающую обучение модели. Отдельные точки располагаются далеко от диагонали, что указывает на наличие значимых ошибок в предсказаниях. Причины могут включать плохую репрезентативность таких случаев в обучающем наборе, трудности распознавания сложных ситуаций или аномалии в данных. Возможно, в модель необходимо включить дополнительные входные признаки, такие как вид растения и физически измеряемую толщину листа. В целом модель работает удовлетворительно, особенно для малых значений CC , но требует доработки для повышения точности предсказаний в полном диапазоне возможных значений.

На рисунке 10 представлен график распределения ошибок предсказания, имеющий вид нормального распределения с центром в районе нулевого значения, что свидетельствует о ряде положительных качеств модели.



Р и с. 9. Сопоставление фактических и предсказанных значений

F i g. 9. True vs predicted values

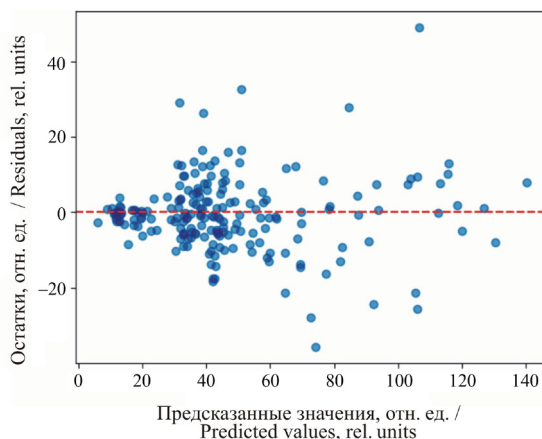


Р и с. 10. График распределения ошибок предсказания

F i g. 10. The graph of prediction error distribution

Форма кривой указывает на хорошую статистику обученной модели. Симметричность и центрирование пика около нуля предполагают, что большинство ошибок невелики и сконцентрированы около среднего значения. Это важный аспект, подтверждающий устойчивость и правильность работы модели. Пик кривой располагается около нулевых ошибок, его величина указывает на значительную долю успешных предсказаний с малой ошибкой. Подавляющее большинство ошибок находится в пределах диапазона ± 20 отн. ед. Присутствие редких выбросов на краях графика подразумевает существование небольшого процента крупных ошибок. Такие исключения важны для понимания источников систематических сбоев модели и требуют отдельного анализа. Наблюдаемая картина распределения ошибок свидетельствует о приемлемом уровне качества модели, что обеспечит надежность и применимость модели в практических целях.

На рисунке 11 представлен график остатков, в котором сравнивается разница между предсказанными и действительными значениями *СС*, что помогает диагностировать качество модели, выявляет ее сильные и слабые стороны. Их случайное и несмещенное распределение относительно нуля соответствует одному из ключевых статистических предположений регрессионного анализа.



Р и с. 11. График остатков
F i g. 11. Residuals graph

Распределение точек близко к горизонтальной нулевой линии свидетельствует о правильном направлении работы модели. Большинство остатков стремятся к нулю, что указывает на малые ошибки предсказания. Преобладание точек в диапазоне низких значений *СС* говорит о лучшей точности модели при прогнозировании в этой области. Несколько точек заметно удаляются от нулевой линии, демонстрируя значительные ошибки предсказания. Равномерное распределение отрицательных и положительных остатков по обе стороны от нулевой линии поддерживает предположение о независимости ошибок от направлений (нет смещения в положительную или отрицательную сторону). Ограниченный диапазон колебаний остатков вокруг нуля указывает на хороший баланс модели, сводящий риск серьезных ошибок к минимуму.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования демонстрируют возможность создания компактной и достаточно точной модели, способной работать в реальном времени и обеспечивать объективную оценку физиологического состояния растений. Это имеет значение не только для совершенствования методов экологического мониторинга, но и для поддержки принятия решений при управлении культивированием растений, особенно в условиях изменения климатических параметров и необходимости повышения устойчивости аграрных систем. Предлагаемый подход может быть использован в цифровых агротехнологиях, направленных на оптимизацию режимов выращивания растений, повышение продуктивности и снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду.

В ходе проведенного исследования обоснована структура и обучена ИНС для прогнозирования CC в листьях растений на основе данных об их оптической плотности в отдельных диапазонах видимого спектра. Предложенная модель демонстрирует достаточную точность при минимальных вычислительных затратах, что позволяет реализовать ее в микроконтроллерном устройстве – листовом фотокolorиметре. Таким образом, поставленная цель – создание эффективного инструмента для быстрой и неразрушающей оценки физиологического состояния растений – достигнута.

Наиболее точной среди исследованных архитектур оказалась сеть «32:32», обеспечившая коэффициент детерминации $R^2 = 0,8886$ и среднюю абсолютную ошибку $MAE = 6,64$ относительных единиц. Однако для практического применения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов выбрана упрощенная структура «4:4», которая сохранила приемлемый уровень точности ($R^2 = 0,8808$, $MAE = 6,83$) при значительном снижении объема используемой памяти и количества параметров модели. Это позволило адаптировать нейросеть под аппаратные ограничения портативного устройства, расширив тем самым возможности ее применения в полевых условиях.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования машинного обучения в задачах неразрушающего анализа состояния растений. В отличие от традиционных методов, требующих длительной подготовки образцов и их разрушения, предложенный подход обеспечивает оперативное получение информации, необходимой для принятия решений в управлении агротехнологическими процессами. Кроме того, использование ИНС позволило повысить точность прогноза по сравнению с классическими эмпирическими моделями, особенно в условиях неоднородности исходных данных.

Анализ графиков ошибок и остатков показал, что модель устойчива к случайным отклонениям и демонстрирует хорошие обобщающие способности. Особенно высокая точность наблюдается при оценке образцов с низким и средним уровнем CC , что делает модель актуальной для диагностики стрессовых состояний растений, связанных с недостатком питательных веществ или воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды.

Предложены гипотезы о возможных причинах крупных ошибок предсказания:

1. Биологическая вариабельность. Наибольшие ошибки могли быть связаны с образцами, имеющими атипичное анатомическое строение (например, аномальная толщина кутикулы, губчатой ткани или наличие опушения), которое не полностью учитывается тремя измеряемыми спектральными каналами.

2. Неучтенные факторы. На содержание хлорофилла и оптические свойства могут влиять физиологическое состояние растения (водный стресс, начало цветения), не регистрируемое напрямую прибором, а также видовые особенности, не закодированные явно в модели.

3. Ограниченность данных. Выбросы могут соответствовать редким комбинациям входных параметров, недостаточно представленным в обучающей выборке, что приводит к ухудшению обобщающей способности модели в этих «слепых зонах».

Для минимизации подобных ошибок в будущем планируется расширить датасет, включив в него больше образцов с экстремальными значениями, а также рассмотреть добавление дополнительных входных признаков, таких как вид растения и объективно измеряемая толщина листа.

Результаты работы имеют важное практическое значение для развития цифровых технологий в сельском хозяйстве. Разработанное устройство может быть использовано как часть систем экологического мониторинга, управления удобрением и поливом, а также в программе фенотипирования сельскохозяйственных культур. Его внедрение позволит повысить точность аграрных технологий, снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду и увеличить урожайность сельскохозяйственных культур.

Перспективы масштабирования разработанной модели на другие виды растений и агроклиматические условия являются обнадеживающими, но требуют дополнительной валидации. Универсальность подхода обеспечивается тем, что в основе модели лежат фундаментальные физические принципы – поглощение света пигментами хлорофилла в синей и красной областях спектра, что характерно для всех высших растений. Однако для достижения высокой точности на новых культурах (например, злаках или плодовых деревьях) может потребоваться дообучение модели на репрезентативных данных для этих видов. Это позволит алгоритму адаптироваться к специфике морфологии листа (толщина, восковой налет) и характерным диапазонам содержания хлорофилла. Текущая модель, обученная на данных по салату, перцу, томату и кабачку, уже демонстрирует хорошую обобщающую способность в пределах близких видов. Дальнейшие исследования будут направлены на проверку переносимости модели и разработку процедуры ее быстрой калибровки под новые условия.

Предложенная модель предназначена для реализации в микроконтроллерном устройстве – листовом фотоколориметре, что открывает возможности для ее использования в мобильных системах мониторинга и управления агротехническими процессами. Особое внимание уделено балансу между точностью предсказаний и вычислительной эффективностью модели, что делает ее пригодной для практического применения даже в условиях ограниченных аппаратных ресурсов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с улучшением точности модели за счет расширения датасета, введения дополнительных входных параметров (например, толщины листа или вида растения), а также перехода к мультиспектральному анализу. Также целесообразно продолжить работу по минимизации модели без потери качества прогноза, чтобы обеспечить ее функционирование на более простых и доступных контроллерах. Повышение информативности измерений и расширение возможностей автоматической интерпретации данных открывает новые горизонты для интеграции цифровых решений в современное сельское хозяйство.

Таким образом, применение методов машинного обучения в сочетании с компактными измерительными устройствами открывает реальные пути к созданию интеллектуальных систем мониторинга и управления состоянием растений, которые станут основой устойчивого и высокотехнологичного агропроизводства будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qiao L., Tang W., Gao D., Zhao R., An L., Li M. и др. UAV-Based Chlorophyll Content Estimation by Evaluating Vegetation Index Responses Under Different Crop Coverages. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;196:106775. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106775>
2. Урбанович Е.А., Афонников Д.А., Николаев С.В. Определение количественного содержания хлорофиллов в листьях по спектрам отражения алгоритмом случайного леса. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(1):64–70. <https://doi.org/10.18699/VJ21.008>
3. Gao C., Li H., Wang J., Zhang X., Huang K., Song X. и др. Combined Use of Spectral Resampling and Machine Learning Algorithms to Estimate Soybean Leaf Chlorophyll. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;108675. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108675>
4. Angel Y., McCabe M.F. Machine Learning Strategies for the Retrieval of Leaf-Chlorophyll Dynamics: Model Choice, Sequential Versus Retraining Learning, and Hyperspectral Predictors. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:722442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.722442>
5. Ерошенко Ф.В., Лапенко Н.Г., Сторчак И.Г., Бильдиева Е.А., Костицын Р.Д., Старостина М.А. Оценка природных растительных сообществ с использованием данных дистанционного зондирования Земли в условиях степей Ставропольского края. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(3):390–409. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.390-409>
6. Zhang Y., Hui J., Qin Q., Sun Y., Zhang T., Sun H. и др. Transfer-learning-based Approach for Leaf Chlorophyll Content Estimation of Winter Wheat from Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*. 2021;267:112724. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112724>
7. Ta N., Chang Q., Zhang Y. Estimation of Apple Tree Leaf Chlorophyll Content Based on Machine Learning Methods. *Remote Sensing*. 2021;13(19):3902. <https://doi.org/10.3390/rs13193902>
8. Li D., Hu Q., Ruan S., Liu J., Zhang J., Hu C. и др. Utilizing Hyperspectral Reflectance and Machine Learning Algorithms for Non-Destructive Estimation of Chlorophyll Content in Citrus Leaves. *Remote Sensing*. 2023;15(20):4934. <https://doi.org/10.3390/rs15204934>
9. Nofrizal A.Y., Sonobe R., Yamashita H., Ikka T., Morita A. Estimation of Chlorophyll Content in Radish Leaves Using Hyperspectral Remote Sensing Data and Machine Learning Algorithms. In: *Proceedings Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII*. 2021;1185609. <https://doi.org/10.1117/12.2600072>
10. Zhu W., Sun Z., Yang T., Li J., Peng J., Zhu K. и др. Estimating Leaf Chlorophyll Content of Crops via Optimal Unmanned Aerial Vehicle Hyperspectral Data at Multi-Scales. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;178:105786. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105786>
11. Yu R., Zhu X., Cao S., Xiong J., Wen X., Jiang Y. и др. Оценка содержания хлорофилла в листьях яблонь на основе гиперспектральных изображений. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2019;86(3): 425–432. URL: <https://zhps.ejournal.by/jour/article/view/581> (дата обращения: 15.02.2022).
12. Narmilan A., Gonzalez F., Salgadoe A.S.A., Kumarasiri U.W.L.M., Weerasinghe H.A.S., Kulasekara B.R. Predicting Canopy Chlorophyll Content in Sugarcane Crops Using Machine Learning Algorithms and Spectral Vegetation Indices Derived from UAV Multispectral Imagery. *Remote Sensing*. 2022;14(5):1140. <https://doi.org/10.3390/rs14051140>
13. Zhang H., Ge Y., Xie X., Atefi A., Wijewardane N. K., Suresh T. High Throughput Analysis of Leaf Chlorophyll Content in Sorghum Using RGB, Hyperspectral, and Fluorescence Imaging and Sensor Fusion. *Plant Methods*. 2022;18:60. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00892-0>
14. Nagy A., Szabo A., Elbeltagi A., Nxumalo G.S., Bodi E.B., Tamas J. Hyperspectral Indices Data Fusion-Based Machine Learning Enhanced by MRMR Algorithm for Estimating Maize Chlorophyll Content. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1419316. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1419316>
15. Чернышев Д.Н., Ключкова В.С., Лелеков А.С. Моделирование спектра поглощения культуры *Phaeodactylum Tricornutum* Bohlin в красной области. *Вопросы современной альгологии*. 2023;1(31):19–27. [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2023-1\(31\)-19-27](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2023-1(31)-19-27)
16. Абдурахимов А.А., Пономарев К.О., Прохoshин А.С. Интеграция методов машинного обучения для раннего обнаружения патогенов в растениях на основе анализа хлорофилла. *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. 2024;(5):107–114. URL: <https://journals.airi.uz/index.php/vpvm/article/view/79/77> (дата обращения: 24.02.2025).

17. Novichonok E.V., Novichonok A.O., Kurbatova J.A., Markovskaya E.F. Use of the atLEAF+ Chlorophyll Meter for a Nondestructive Estimate of Chlorophyll Content. *Photosynthetica*. 2016;54(1):130–137. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0172-8>
18. Xavier W.D., Castoldi G., Cavalcante T.J., Rodrigues C.R., Trindade P.R., Luiz I.A. и др. Portable Chlorophyll Meter for Indirect Evaluation of Photosynthetic Pigments and Nitrogen Content in Sweet Sorghum. *Sugar Tech*. 2021;23:560–570. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00922-y>
19. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Мишанов А.П. Влияние параметров световой среды на содержание хлорофилла в листьях рассады томата и их оптические свойства. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020;60:67–74. URL: https://spbgau.ru/life/newspaper/zhurnal-izvestiya/?SECTION_CODE=zhurnal-izvestiya&PAGEN_1=2# (дата обращения: 22.02.2025).
20. Ракутько С.А., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н., Маркова А.Е. Дисперсионный анализ биометрических показателей и содержания хлорофилла в листьях рассады томата, выращиваемой в различных условиях световой среды. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2020;(2):30–44. URL: <https://agroecoengineering.szni.ru/arkhiv-zhurnala.html> (дата обращения: 17.02.2025).
21. Панарин В.М., Гришаков К.В., Маслова А.А., Гришакова О.В., Архипов А.В. Применение искусственных нейронных сетей в инженерно-технических и экологических разработках. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022;(4):278–284. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_thereist_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2022_04_a&year=2022 (дата обращения: 24.02.2025).
22. Кутырев А.И., Филиппов Р.А. Применение сверточной нейронной сети для мониторинга состояния земляники садовой. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(4):685–696. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.4.685-696>
23. Черепенин В.А., Кацупеев А.А. Анализ подходов к созданию системы «Умная теплица» на основе нейронной сети. *Программные системы и вычислительные методы*. 2024;(1):68–78. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2024.1.69794>
24. Смирнов А.В., Тищенко И.П. Применение Сиамских нейронных сетей для классификации биомассы растений по визуальному состоянию. *Программные системы: теория и приложения*. 2024;15(3):53–74. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2024-15-3-53-74>
25. Воробьев Н.И., Лысов А.К., Корнилов Т.В., Хютти А.В. Вычислительная нейросеть для обработки светоотражательных спектров растений и дистанционного фитосанитарного мониторинга картофеля. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(2):283–292. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.283-292>
26. Ракутько С.А. Становление и развитие энергоэкологии светокультуры как нового научного направления в институте агроинженерных и экологических проблем. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2024;(2):331–346. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-02-40>
27. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Васькин А.Н., Горбатенко Н.А., Забодаев Д.П., Яковенко Н.И. Применение измерителя ССМ-200 для оперативного определения содержания хлорофилла в листьях растений светокультуры. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2017;(92):18–25. <https://www.elibrary.ru/zmeaoj>
28. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Методика измерения оптической плотности листьев растений с применением денситометра ДП-1М. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018;(94):23–35. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10003>
29. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Листовой фотоколориметр – устройство для измерения оптических свойств листьев растений. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2020;(1):15–24. <https://www.elibrary.ru/aaxvrv>

REFERENCES

1. Qiao L., Tang W., Gao D., Zhao R., An L., Li M., et al. UAV-Based Chlorophyll Content Estimation by Evaluating Vegetation Index Responses Under Different Crop Coverages. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;196:106775. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106775>

2. Urbanovich E.A., Afonnikov D.A., Nikolaev S.V. Determination of the Quantitative Content of Chlorophylls in Leaves by Reflection Spectra Using the Random Forest Algorithm. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(1):64–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18699/VJ21.008>
3. Gao C., Li H., Wang J., Zhang X., Huang K., Song X., et al. Combined Use of Spectral Resampling and Machine Learning Algorithms to Estimate Soybean Leaf Chlorophyll. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;108675. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108675>
4. Angel Y., McCabe M.F. Machine Learning Strategies for the Retrieval of Leaf-Chlorophyll Dynamics: Model Choice, Sequential Versus Retraining Learning, and Hyperspectral Predictors. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:722442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.722442>
5. Eroshenko F.V., Lapenko N.G., Storchak I.G., Bildieva E.A., Kostitsyn R.D., Starostina M.A. Assessment of Natural Plant Communities through the Use of Remote Sensing Data of the Stavropol Territory Steppes. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):390–409. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.390-409>
6. Zhang Y., Hui J., Qin Q., Sun Y., Zhang T., Sun H., et al. Transfer-learning-based Approach for Leaf Chlorophyll Content Estimation of Winter Wheat from Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*. 2021;267:112724. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112724>
7. Ta N., Chang Q., Zhang Y. Estimation of Apple Tree Leaf Chlorophyll Content Based on Machine Learning Methods. *Remote Sensing*. 2021;13(19):3902. <https://doi.org/10.3390/rs13193902>
8. Li D., Hu Q., Ruan S., Liu J., Zhang J., Hu C., et al. Utilizing Hyperspectral Reflectance and Machine Learning Algorithms for Non-Destructive Estimation of Chlorophyll Content in Citrus Leaves. *Remote Sensing*. 2023;15(20):4934. <https://doi.org/10.3390/rs15204934>
9. Nofrizal A.Y., Sonobe R., Yamashita H., Ikka T., Morita A. Estimation of Chlorophyll Content in Radish Leaves Using Hyperspectral Remote Sensing Data and Machine Learning Algorithms. In: *Proceedings Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII*. 2021;1185609. <https://doi.org/10.1117/12.2600072>
10. Zhu W., Sun Z., Yang T., Li J., Peng J., Zhu K., et al. Estimating Leaf Chlorophyll Content of Crops via Optimal Unmanned Aerial Vehicle Hyperspectral Data at Multi-Scales. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;178:105786. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105786>
11. Yu R., Zhu X., Cao S., Xiong J., Wen X., Jiang Y., et al. Estimation of Chlorophyll Content in Apple Leaves Based on Imaging Spectroscopy. *Zurnal Prikladnoj Spektroskopii*. 2019;86(3):425–432. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://zhps.ejournal.by/jour/article/view/581> (accessed 15.02.2022).
12. Narmilan A., Gonzalez F., Salgadoe A.S.A., Kumarasiri U.W.L.M., Weerasinghe H.A.S., Kulasekara B.R. Predicting Canopy Chlorophyll Content in Sugarcane Crops Using Machine Learning Algorithms and Spectral Vegetation Indices Derived from UAV Multispectral Imagery. *Remote Sensing*. 2022;14(5):1140. <https://doi.org/10.3390/rs14051140>
13. Zhang H., Ge Y., Xie X., Atefi A., Wijewardane N. K., Suresh T. High Throughput Analysis of Leaf Chlorophyll Content in Sorghum Using RGB, Hyperspectral, and Fluorescence Imaging and Sensor Fusion. *Plant Methods*. 2022;18:60. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00892-0>
14. Nagy A., Szabo A., Elbeltagi A., Nxumalo G.S., Bodi E.B., Tamas J. Hyperspectral Indices Data Fusion-Based Machine Learning Enhanced by MRM Algorithm for Estimating Maize Chlorophyll Content. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1419316. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1419316>
15. Chernyshev D.N., Klochkova V.S., Lelekov A.S. Modeling of the Absorption Spectrum of Phaeodactylum Tricornutum Bohlin in the Red Area. *Issues of Modern Algology*. 2023;1(31):19–27. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2023-1\(31\)-19-27](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2023-1(31)-19-27)
16. Abdurakhimov A.A., Ponomarev K.O., Prokoshin A.S. Integration of Machine Learning Methods for Early Detection of Pathogens in Plants Based on Chlorophyll Analysis. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 2024;(5):107–114. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://journals.airi.uz/index.php/pvpm/article/view/79/77> (accessed: 24.02.2025).
17. Novichonok E.V., Novichonok A.O., Kurbatova J.A., Markovskaya E.F. Use of the atLEAF+ Chlorophyll Meter for a Nondestructive Estimate of Chlorophyll Content. *Photosynthetica*. 2016;54(1):130–137. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0172-8>
18. Xavier W.D., Castoldi G., Cavalcante T.J., Rodrigues C.R., Trindade P.R., Luiz I.A., et al. Portable Chlorophyll Meter for Indirect Evaluation of Photosynthetic Pigments and Nitrogen Content in Sweet Sorghum. *Sugar Tech*. 2021;23:560–570. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00922-y>

19. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Mishanov A.P. Impact of Light Environment Parameters on the Chlorophyll Content in Tomato Transplant Leaves and Their Optical Properties. *Izvestiya Sainkt-Petersburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2020;60:67–74. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://spbgau.ru/life/newspaper/zhurnal-izvestiya/?SECTION_CODE=zhurnal-izvestiya&PAGEN_1=2# (accessed 22.02.2025).
20. Rakutko S.A., Mishanov A.P., Rakutko E.N., Markova A.E. Variance Analysis of Biometric Indicators and Chlorophyll Content in Tomato Seedling Leaves Grown in Different Light Conditions. *Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production*. 2020;(2):30–44. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://agroecoengineering.sznii.ru/ru/arkhiv-zhurnala.html> (accessed 17.02.2025).
21. Panarin V.M., Grishakov K.V., Maslova A.A., Grishakova O.V., Arkhipov A.V. Application of Artificial Neural Networks in Engineering and Environmental Developments. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2022;(4):278–284. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2022_04_a&year=2022 (accessed 24.02.2025).
22. Kutryev A.I., Filippov R.A. Application of Convolutional Neural Network for Monitoring the Condition of Strawberries. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023;24(4):685–696. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.4.685-696>
23. Cherepenin V.A., Katsuphev A.A. Analysis of Approaches to Creating a “Smart Greenhouse” System Based on a Neural Network. *Software Systems and Computational Methods*. 2024;(1):68–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2024.1.69794>
24. Smirnov A.V., Tishchenko I.P. Application of Siamese Neural Networks to Classify Plant Biomass by Visual State. *Program Systems: Theory and Applications*. 2024;15(3):53–74. (In Russ. abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2024-15-3-53-74>
25. Vorobyov N.I., Lysov A.K., Kornilov T.V., Hyutti A.V. Computational Neural Network for Processing Light-Reflective Spectra of Plants and Remote Phytosanitary Monitoring of Potatoes. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(2):283–292. (In Russ. abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.283-292>
26. Rakutko S.A. Formation and Development of Energy and Ecology Convergence in Greenhouse Horticulture as a New Scientific Field at the Institute of Agricultural Engineering and Environmental Problems. *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*. 2024;(2):331–346 (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-02-40>
27. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Vaskin A.N., Gorbatenko N.A., Zabodaev D.P., Yakovenko N.I. Rapid Estimation of Leaf Chlorophyll Content in Indoor Plant Lighting by Portable CCM-200 Meter. *Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production*. 2017;(92):18–25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/zmeaoj>
28. Rakutko E.N., Rakutko S.A. Measurement Technique of Plant Leave Optical Density with DP-1M Densitometer. *Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production*. 2018;(94):23–35. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10003>
29. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Vaskin A.N. Leaf Photocolorimeter – a Device for Measuring the Optical Properties of Plant Leaves. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2020;(1):15–24. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/aaxrvv>

Об авторах:

Ракутко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филитровское ш., д. 3) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Researcher ID: B-2745-2014, sergej1964@yandex.ru

Ракутко Елена Николаевна, научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филитровское ш., д. 3) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, elena.rakutko@mail.ru

Су Цзянь, кандидат технических наук, старший инженер Исследовательского института оборудования для сельского хозяйства Академии сельскохозяйственных наук Синьцзян-Уйгурского автономного района (830091, Китайская Народная Республика, г. Урумчи, ул. Наньчаннан, 291), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5120-3623> SPIN-код: 6210-611, sulao7@aliyun.com

Вклад авторов:

С. А. Ракутько – формулирование замысла исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Е. Н. Ракутько – применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных

Ц. Су – написание программного кода и реализация вспомогательных алгоритмов; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 17.06.25; поступила после рецензирования 25.09.2025;
принята к публикации 08.10.2025*

About the authors:

Sergei A. Rakutko, Dr.Sci (Eng.), Chief Researcher of the Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IIEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Researcher ID: B-2745-2014, sergej1964@yandex.ru

Yelena N. Rakutko, Researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IIEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg, 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, elena.rakutko@mail.ru

Jian Su, Cand.Sci (Eng.), Senior Engineer, Research Institute of Agricultural Equipment, Academy of Agricultural Sciences, Xinjiang Uygur Autonomous Region (291 Nanchannan St., Urumqi 830091, People's Republic of China), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5120-3623>, SPIN-code: 6210-6114, sulao7@aliyun.com

Authors contribution:

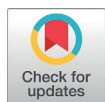
S. A. Rakutko – formulating the study ideas, objectives and aims. preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and data obtained.

E. N. Rakutko – using statistical, mathematical, computational or other formal techniques to analyze or synthesize the study data; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments and data collection.

J. Su – creating the computer code and implementing supporting algorithms, preparing and presenting the manuscript, specifically writing the initial manuscript draft (including the translation of the manuscript into the English language).

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 17.06.2025; revised 25.09.2025; accepted 08.10.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.700-722>EDN: <https://elibrary.ru/ncdqgo>

УДК / UDK 004.9:623.746

Оригинальная статья / Original article

**Компьютерное моделирование автоматического
управления сельскохозяйственным
малым беспилотным летательным аппаратом
с переменной массой****М. И. Белов[✉], С. А. Андреев, Е. А. Шабает, Н. Е. Кабдин, Д. В. Белов***Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К. А. Тимирязева,
г. Москва, Российская Федерация*[✉] belov@rgau-msha.ru*Аннотация*

Введение. Малые беспилотные летательные аппараты эффективно используются в сельском хозяйстве для обработки полей, но из-за большой дальности полета ручное управление с земли рулем высоты и тягой двигателя не позволяет поддерживать требуемые скорость и высоту над полем с необходимой точностью для обеспечения его равномерной обработки. Целесообразно управление рулем высоты и тягой двигателя осуществлять в автоматическом режиме. Переменная в полете масса летательного аппарата и неоднородный рельеф поля до настоящего времени не учитывались в достаточной мере в исследованиях по стабилизации высоты полета и его устойчивости.

Цель исследования. Оценить влияние изменения массы малого беспилотного летательного аппарата на высоту полета и скорость центра масс при их стабилизации в режиме автоматического управления рулем высоты и тягой двигателя.

Материалы и методы. Объект исследования – малый беспилотный летательный аппарат. При компьютерном моделировании автоматического управления рулем высоты и тягой двигателя летательного аппарата для стабилизации высоты полета использованы методы дифференциальных уравнений, теоретической механики, автоматического управления, программирования в среде Lazarus, численные методы. Наряду с указанными методами, используемыми в статье, также были применены методы визуального моделирования, реализованные в среде Scilab XCOS. Данные методы позволили дать оценку адекватности компьютерной модели.

Результаты исследования. Разработаны компьютерные модели программного и траекторного управления полетом малых беспилотных летательных аппаратов на заданной высоте с заданной скоростью. Программное управление рулем высоты и тягой двигателя, определенное из решения дифференциальных уравнений

© Белов М. И., Андреев С. А., Шабает Е. А., Кабдин Н. Е., Белов Д. В., 2025

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

продольного полета малого беспилотного летательного аппарата при заданном траекторном угле и скорости, позволило точно стабилизировать высоту и скорость. Траекторное управление рулем высоты и тягой двигателя по показаниям датчиков высоты, угла тангажа, угловой скорости и скорости позволило «отслеживать» заданный рельеф поля и стабилизировать высоту и скорость полета с достаточной точностью. Установлено, что на участках полета с уменьшением полетной массы высота, скорость полета и траекторный угол стабилизируются, а угол тангажа уменьшается вместе с массой, при большой заданной скорости полета над полем с отрицательным углом наклона (на спусках) угол тангажа становится отрицательным (некомфортным), возможна потеря управления.

Обсуждение и заключение. Уменьшение полетной массы беспилотного летательного аппарата необходимо учитывать при их использовании в сельском хозяйстве для обработки полей. Проведенные исследования программного и траекторного управления для стабилизации высоты полета позволили установить связь между изменением массы и такими управляемыми параметрами, как угол тангажа и скорость центра масс летательного аппарата. Программное управление обеспечивает стабилизацию высоты полета при любом профиле поля, но его точность связана с точностью математической модели и без обратной связи с реальными данными полета не позволяет оценить истинную точность расчетов текущей высоты полета и скорости летательного аппарата. Траекторное управление с пропорционально-интегральным регулятором позволяет учитывать обратные связи. Как показали расчеты, такое управление полетом над полем с уклоном вниз может привести к потере устойчивости и падению летательного аппарата. Поле с неоднородным рельефом содержит участки, на которых уровень понижается. Они служат источником дискомфорта полета и потери устойчивости.

Ключевые слова: малый беспилотный летательный аппарат (МБЛА), траекторное управление МБЛА, полет МБЛА с переменной массой, компьютерная модель

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Белов М.И., Андреев С.А., Шабаетв Е.А., Кабдин Н.Е., Белов Д.В. Компьютерное моделирование автоматического управления сельскохозяйственным малым беспилотным летательным аппаратом с переменной массой. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):700–722. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.700-722>

Computer Simulation of Automatic Control of an Agricultural Small Unmanned Aerial Vehicle with Variable Mass

M. I. Belov[✉], S. A. Andreev, E. A. Shabaev,
N. E. Kabdin, D. V. Belov

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation

[✉] belov@rgau-msha.ru

Abstract

Introduction. Small unmanned aerial vehicles are effectively used in agriculture for field cultivation. Because of the long flight range, manual control from the ground of the elevator and engine thrust does not allow maintaining the required speed and altitude over

the field with the necessary precision to ensure the field uniform processing. The aircraft mass changing in flight and the changing field relief have not yet been taken into account sufficiently in studies on the stabilization of flight altitude and stability. Thus, the study of the automatic control mode of the elevator and engine thrust, ensuring the stabilization of flight altitude under conditions of decreasing aircraft mass and changing field relief, can be considered a relevant and insufficiently studied problem.

Aim of the Study. The study is aimed at evaluating the impact of mass changes of a small unmanned aerial vehicle on the flight altitude and of the center-of-mass speed of the vehicle during their stabilization in the automatic elevator and engine thrust control mode.

Materials and Methods. The object of the study is a small unmanned aerial vehicle. There were used the methods of differential equations, theoretical mechanics, automatic control, programming in the Lazarus development environment, and numerical methods were used for computer modeling of automatic control of the elevator and engine thrust of an aircraft to stabilize flight altitude. Along with the methods mentioned in the article, there were used visual simulation methods implemented in the Scilab XCOS environment. These methods made it possible to assess the adequacy of the computer model.

Results. There have been developed two computer models for automated control of a small unmanned aerial vehicle flight at a given altitude and speed. Software control of the elevator and engine thrust, determined based on the solution of differential equations of longitudinal flight of a small unmanned aerial vehicle at a given trajectory angle and a given speed, made it possible to stabilize the altitude and speed. Trajectory management of the elevator and engine thrust based on the readings from altitude, pitch angle, angular velocity and speed sensors made it possible to “track” a given field relief and stabilize the altitude and flight speed with sufficient accuracy. It has been found that in flight sections with a decrease in flight mass, the altitude, flight speed and trajectory angle are stabilized, and the pitch angle decreases along with the mass, and at a high specified flight speed over a field with a negative angle of inclination (on descents) the pitch angle becomes negative (uncomfortable) and loss of control is possible.

Discussion and Conclusion. Reducing the flight mass of an unmanned aerial vehicle must be taken into account when using these devices in agriculture for pest control and other work related to the processing of agricultural crops. The conducted study of software and trajectory control for stabilizing flight altitude made it possible to determine the relationship between the change in mass and such controlled parameters as the pitch angle and speed of the mass center of the aircraft. Software control ensures stabilization of flight altitude under any field profile, but its accuracy is caused by the accuracy of the mathematical model and, without taking into account actual flight data, does not allow one to assess the true accuracy of calculations of the current flight altitude and speed of the aircraft. Trajectory control with a proportional-integral controller allows for feedback coupling to be taken into account. The calculations have shown that such control of a flight over a field with a downward slope can lead to a loss of stability and a fall of the aircraft. A field with variable relief has areas where the level decreases and which are the source of uncomfortable flight and loss of flight stability.

Keywords: small unmanned aerial vehicle (SUAV), trajectory control of SUAV, variable mass SUAV flight, computer model

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

For citation: Belov M.I., Andreev S.A., Shabaev E.A., Kabdin N.E., Belov D.V. Computer Simulation of Automatic Control of an Agricultural Small Unmanned Aerial Vehicle with Variable Mass. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):700–722. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.700-722>

ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства вопросы управления технологическими процессами без участия человека становятся все более востребованными. Наравне с наземными мобильными машинами [1] в сельскохозяйственном производстве активно используются летательные аппараты, при этом «возможности применения малых беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве оказались гораздо шире их изначального основного назначения» [2]. Одна из областей их применения связана с обработкой полей препаратами для уничтожения вредителей, а также с внесением удобрений. Полеты осуществляются на небольшой высоте, и, во избежание нарушения норм внесения активного вещества на единицу площади поля, необходимо обеспечить равномерность внесения препаратов за счет поддержания заданной высоты полета над поверхностью поля и скорости малых беспилотных летательных аппаратов (МБЛА). Такой режим полета можно обеспечить за счет соответствующего управления рулем высоты и тягой двигателя. При этом необходимо учесть, что масса летательного аппарата, осуществляющего обработку поля от вредителей, может значительно уменьшаться до 30 % и более. Вопросы влияния изменения полетной массы на характеристики и устойчивость полета в исследованиях автоматического управления полетом МБЛА не рассматривались. Ввиду уменьшения массы во время полета коэффициенты дифференциальных уравнений движения МБЛА становятся переменными, применение методов операционного исчисления и передаточных функций требует дополнительных обоснований. В настоящем исследовании изложены результаты, полученные с помощью двух компьютерных моделей автоматического управления полетом: программного и траекторного. Рельеф поля в продольной плоскости полета представлен двумя формами: прямой и волнистой наклонными линиями. В первой модели управление рассчитывалось с помощью дифференциальных уравнений продольного полета МБЛА с переменной массой при задании траекторного угла и скорости центра масс летательного аппарата, во второй – полет моделировался дифференциальными уравнениями движения тела переменной массы с заданием функций управления рулем высоты и тяги двигателя по показаниям датчиков высоты и угла тангажа.

Целью исследования является оценка влияния переменной массы на высоту полета и скорость центра масс МБЛА при их стабилизации в режиме автоматического управления рулем высоты и тягой двигателя.

Задачи исследования включают в себя разработку алгоритма управления летательным аппаратом и компьютерных моделей управления полетом, моделирование в среде программирования Lazarus и в среде визуального моделирования XCOS Scilab, оценку точности управления в условиях изменяющегося рельефа поля.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) можно использовать как важное звено эффективной системы защиты растений от болезней и вредителей. Для этого следует провести исследования зависимости ширины опрыскивания

от высоты полета БПЛА и нормы рабочего раствора [3]. В результате производственно-полевых опытов установлено, что при планировании полетного задания необходимо учитывать высоту обработки, норму внесения рабочего раствора и ширину захвата. Особенно важно соблюдение ширины захвата во время обработки гербицидами, поскольку ошибка может привести к пропускам, перерасходу препарата и гибели растений. По мнению А. Г. Кузнецова, для повышения точности позиционирования и оценки навигационных параметров МБЛА во время полета целесообразно использовать систему технического зрения. При этом алгоритмы обработки видовой информации сложны, трудоемки и затратны по времени их реализации; для навигации МБЛА необходимы средства управления динамикой летательного аппарата и измерения параметров, а также вычислительные средства [4].

В работе А. В. Архипова и С. П. Тимошенкова представлена разработанная математическая модель и описаны проведенные исследования преимуществ адаптированной системы управления углом тангажа БПЛА [5]. Угол тангажа служит управляемым параметром, с помощью которого можно руководить траекторным углом и траекторией полета, также для синтеза системы управления и стабилизации полета МБЛА рекомендуется применять метод бэкстеппинга [6], согласно которому задача разработки закона управления для всей системы разбивается на последовательность соответствующих подзадач до подсистем меньшего порядка. Приведены результаты численного моделирования в среде Matlab движения БПЛА с полученным регулятором, доказывающие устойчивость системы в больших пределах коэффициентов регулятора.

Методы и алгоритмы формирования динамической системы, моделирующей с заданной точностью целевую миссию БПЛА, представлены В. Е. Усачовым и Р. Ч. Таргамадзе [7]. Оценка точности такой модели осуществляется на основе предложенных критериев качества. Управление полетом МБЛА моделируется как в пространстве, так и в вертикальной плоскости. При этом математическая модель БПЛА как объекта управления представляется в виде линеаризованных математических моделей движения БПЛА [8].

В исследовании А. В. Потудинского отмечается наличие широкого диапазона неопределенностей при управлении динамикой полета различных беспилотных летательных аппаратов и предложены методы, обеспечивающие устойчивость управления в условиях неопределенностей [9]. Представляют интерес алгоритмы генерации траектории полета МБЛА через заданные путевые точки [10]. Такие алгоритмы можно использовать при разработке алгоритмов управления МБЛА по карте поля. Наряду с вопросами управления полетом МБЛА в научной литературе поднимаются вопросы исследований параметров руля высоты и элеронов [11]. Важные для проектировщиков МБЛА исследования поверхностей элеронов и элевонных позволили найти решения, обеспечивающие устойчивость управления полетом МБЛА. С. Ч. Фам, А. Д. Сурковой и М. С. Селезневой предложены алгоритмы управления МБЛА, позволяющие повысить точность позиционирования МБЛА в базовой инерциальной системе за счет коррекции управления

по изображениям местности путем сравнения бортовых радиолокационных снимков с эталонными картами [12]. Задачу вывода беспилотного летательного аппарата в заданную точку пространства (в том числе подвижную) необходимо рассматривать аналогично задачам, которые решаются известными методами синтеза системы самонаведения летательного аппарата на цель [13]. На основе разработанного метода синтеза параметров управления БПЛА предложена методика формирования траектории автоматического облета БПЛА заданной запретной зоны полета. В среде Simulink пакета Matlab произведено моделирование полета МБЛА с отслеживанием траектории его движения в пространстве при воздействии внешних сил (например, ветра) и при отработке сигналов управления рулем высоты, направления, отклонением элерона и дроссельной заслонки [14]. Модель корректно обрабатывает воздействия, возвращая МБЛА на прежний курс.

На моделях и экспериментальным путем изучены четыре стратегии управления МБЛА [15]. Две стратегии основаны на управлении с помощью ПИД-регуляторов, третья реализуется на базе линейно-квадратичного регулятора, четвертая – на управлении регулятором, обеспечивающим прогнозирование. Отмечается надежность ПИД-регуляторов и перспективность контроллеров с функциями прогнозирования. Установлено, что в условиях ветра ПИД-регулятор с оптимальными параметрами настройки обеспечивает более эффективное управление БПЛА при посадке в сравнении с ПИ-регулятором [16].

Было проведено исследование сравнительной эффективности нелинейного ПИД-регулятора и регулятора высокого порядка с настройкой скользящего среднего при управлении полетом БПЛА. [17]. Беспилотный летательный аппарат с фиксированными крыльями моделировался в виде системы с восемью степенями свободы, где учитывались колебания шасси и иных элементов конструкции. Эффективность регуляторов изучалась по ударным воздействиям на колеса шасси. Установлено преимущество нелинейного регулятора. В свою очередь, учеными из Нигерии представлен разработанный прототип БПЛА, который может распылять жидкие пестициды или средства борьбы с сорняками на посевы в сельскохозяйственных предприятиях [18]. Это было сделано путем создания полуавтономного квадрокоптера с системой точного сельскохозяйственного опрыскивания, включающей бак, насос, камеру и форсунки. Таким образом, задача эффективного управления БПЛА в виде квадрокоптера остается актуальной. Следует отметить, что полетная масса летательного аппарата не являлась предметом исследований и принималась постоянной, поэтому вопрос о влиянии ее изменения на управляемые переменные, высоту полета и скорость требует изучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Малый беспилотный летательный аппарат является объектом настоящего исследования.

Методы и оборудование

При разработке математической модели были оспользованы методы дифференциальных уравнений, теоретической механики, автоматического управления, численные методы. Конструктивные параметры и материалы объекта исследования и управления взяты из научной работы Р. У. Биарда и Т. У. Маклэйна¹.

Процедура исследования

Компьютерное моделирование автоматического управления рулем высоты и тягой двигателя летательного аппарата для стабилизации высоты полета над полем с переменным рельефом осуществлялось в среде программирования Lazarus и в среде визуального моделирования XCOS Scilab.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка задачи и уравнения движения тела переменной массы

Примем следующие допущения: МБЛА имеет плоскость симметрии (рис. 1), два пропеллера вращаются в противоположных направлениях; движением воздушной среды можно пренебречь и считать скорость ветра равной нулю; силы, действующие на МБЛА, симметричны относительно плоскости симметрии (рис. 2); кориолисовы силы инерции, действующие со стороны частиц воздуха на лопасти пропеллеров ввиду осевой симметрии пропеллера и плоскостной симметрии, взаимно уравновешиваются.

В соответствии с принятыми допущениями можно предположить, что движение МБЛА плоскопараллельное, продольное, без крена и рысканья (рис. 3).

Запишем уравнения движения центра масс МБЛА m переменной массы вдоль оси Ox и вращения МБЛА вокруг оси, проходящей через центр масс. В соответствии с уравнением Мещерского уравнение изменения импульса представим в виде равенства разности количеств движения частиц МБЛА в моменты $(t + \Delta t)$ и t , с одной стороны, и импульса главного вектора внешних сил, действующих на МБЛА за то же время, с другой:

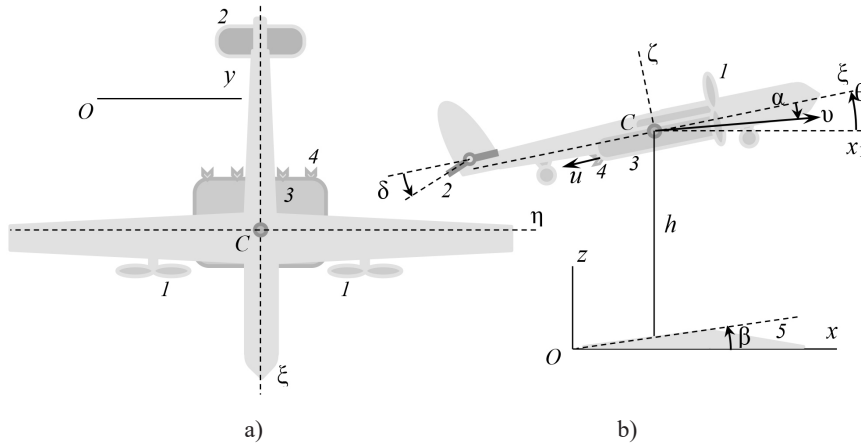
$$[(m + \Delta m)(v_c + \Delta v_c) - \Delta m(v_c + u_m)] - [mv_c] = F_c \Delta t,$$

или после приведения подобных членов и деления уравнения на Δt при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$m \frac{dv_c}{dt} = F_c + \frac{dm}{dt} u_m, \quad (1)$$

где t – время, с; Δm – малое изменение массы МБЛА за малое время Δt , кг ($\Delta m < 0$, если масса убывает); Δv_c – изменение вектора v_c за время Δt ; F_c – главный вектор внешних сил, действующих на малый беспилотный летательный аппарат; u_m – вектор скорости частицы рабочего вещества на выходе из форсунок относительно корпуса летательного аппарата.

¹ Биард Р.У., Маклэй Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты. Теория и практика. М.: Техносфера; 2023. 311 с.



Р и с. 1. Малый беспилотный летательный аппарат при продольном полете без крена:
а) вид сверху; б) вид сбоку:

1 – пропеллеры; 2 – система управления углом тангажа; 3 – рабочая емкость; 4 – форсунки;
5 – прямолинейный участок профиля поля с наклоном под углом β

Fig. 1. Scheme of a small unmanned aerial vehicle in longitudinal flight without roll:
a) viewed from above; b) from the side:

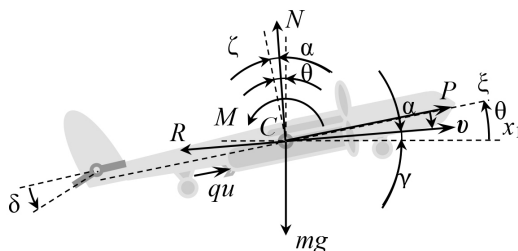
1 – propellers; 2 – elevator actuator; 3 – container with working substance for spraying;
4 – nozzles; 5 – field profile with a rectilinear slope at an angle β

Примечание: $Oxyz$ – неподвижная ортогональная система декартовых координат с началом O на уровне моря, горизонтальными осями Ox , Oy и вертикальной осью Oz , направленной вверх; $C\xi\eta\zeta$ – связанная с малым беспилотным летательным аппаратом ортогональная система декартовых координат с началом C в центре масс малого беспилотного летательного аппарата, осью $C\xi$, совпадающей с главной продольной осью инерции малого беспилотного летательного аппарата, перпендикулярной ей осью $C\zeta$ в плоскости симметрии малого беспилотного летательного аппарата и перпендикулярной обеим этим осям осью $C\eta$; Cx_1 – подвижная горизонтальная ось, параллельная оси Ox ; x, z – координаты центра масс малого беспилотного летательного аппарата (точки C) в неподвижной системе координат по осям Ox , Oz , м; β – угол наклона средней прямой линии профиля поля в продольной вертикальной плоскости, рад; v – величина скорости центра масс малого беспилотного летательного аппарата, м/с; α – угол атаки, образуемый продольной осью $C\xi$ и вектором v или проекцией вектора v на плоскость симметрии малого беспилотного летательного аппарата, рад; h – высота полета над полем, м; δ – угол поворота руля высоты с отсчетом от нулевого положения, рад; u – величина скорости частиц вещества, распыляемого при обработке поля, относительно корпуса малого беспилотного летательного аппарата в направлении, противоположном направлению продольной оси $C\xi$ ($u > 0$), м/с;

Note: $Oxyz$ – a fixed orthogonal system of Cartesian coordinates with the origin O at sea level, horizontal axes Ox , Oy and vertical axis Oz directed upwards; $C\xi\eta\zeta$ – an orthogonal Cartesian coordinate system with origin C associated with a small unmanned aerial vehicle, axis $C\xi$, coinciding with the main longitudinal axis of inertia of a small unmanned aerial vehicle, perpendicular to it by the $C\zeta$ axis in the plane of symmetry of the small unmanned aerial vehicle and perpendicular to both of these axes by the $C\eta$ axis; Cx_1 – movable horizontal axis parallel to the Ox axis; x, z – coordinates of the center of mass of a small unmanned aerial vehicle (point C) in a fixed coordinate system along the axes Ox , Oz , m; β – the angle of inclination of the average straight line of the field profile in the longitudinal vertical plane, rad; v – the value of the speed of the center of mass of a small unmanned aerial vehicle, m/s; α – the angle of attack formed by the longitudinal axis $C\xi$ and the vector v or the projection of the vector v onto the plane of symmetry of a small unmanned aerial vehicle, rad; h – flight altitude above the field, m; δ – elevator rotation angle measured from the zero position, rad; u – the value of the velocity of particles of the substance sprayed during field treatment relative to the body of a small unmanned aerial vehicle in the direction opposite to the direction of the longitudinal axis $C\xi$ ($u > 0$), m/s.

Источник: здесь и далее в статье рисунки составлены авторами.

Source: compiled by the authors of the article.

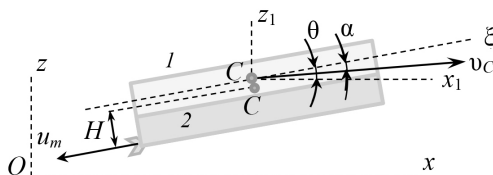


Р и с. 2. Внешние силы, действующие на малый беспилотный летательный аппарат

F i g. 2. External forces acting on the small unmanned aerial vehicle

Примечание: θ – угол тангажа, образуемый осями $C\xi$ и Cx_1 , рад; γ – траекторный угол, образуемый вектором скорости v и осью Cx_1 ($\gamma = \theta - \alpha$), рад; m – масса малого беспилотного летательного аппарата, кг; q – расход рабочего вещества при обработке поля на единицу длины пути вдоль оси Ox , кг/м; P – величина главного вектора сил тяги двух пропеллеров (сила тяги), Н; N – величина главного вектора подъемных сил (подъемная сила), Н; R – величина главного вектора сил сопротивления (сила сопротивления), Н; M – величина главного момента внешних силы относительно оси $C\eta$, Н м; g – ускорение свободного падения материальной точки, м/с².

Note: θ – pitch angle formed by the axes $C\xi$ and Cx_1 , rad γ – trajectory angle formed by the velocity vector v and the Cx_1 axis ($\gamma = \theta - \alpha$), rad; m – mass of a small unmanned aerial vehicle, kg; q – consumption of working substance during field processing per unit length of path along the Ox axis, kg/m; P – the magnitude of the main vector of the thrust forces of two propellers (thrust force), N; N – the magnitude of the main vector of lifting forces (lift force), N; R – the magnitude of the main vector of resistance forces (resistance force), N; M – the magnitude of the principal moment of external forces relative to the $C\eta$ axis, N m; acceleration of gravity of a material point, m/s².



Р и с. 3. Обоснование уравнений движения малого беспилотного летательного аппарата с переменной массой и переменным положением центра масс C :

1 – рабочая емкость; 2 – вещество в рабочей емкости

F i g. 3. To the substantiation for the equations of a small unmanned aerial vehicle motion with variable mass and variable position of the center of mass C :

1 – container; 2 – substance in container

Примечание: v_c – вектор скорости центра масс малого беспилотного летательного аппарата; u_m – вектор скорости частицы рабочего вещества на выходе из форсунок относительно корпуса малого беспилотного летательного аппарата; H – расстояние от центра масс до линии вектора u_m , приложенного к форсунке в плоскости симметрии малого беспилотного летательного аппарата, м.

Note: v_c – velocity vector of the center of mass of a small unmanned aerial vehicle; u_m – the velocity vector of the working substance particle at the outlet of the nozzles relative to the body of the small unmanned aerial vehicle; H – distance from the center of mass to the line of vector u_m applied to the nozzle in the plane of symmetry of a small unmanned aerial vehicle, m.

При выходе рабочего вещества из форсунок проекции векторов v_c и u_m на ось имеют противоположные знаки, а производная массы МБЛА по времени –

отрицательную величину. Уравнение изменения кинетического момента МБЛА запишем в движущейся системе координат с началом в центре масс МБЛА и осями, параллельными неподвижным осям Ox и Oz . Будем полагать, что частицы рабочего вещества в емкости под давлением вращаются вокруг оси вместе с фюзеляжем. Угловая скорость, кинетический момент и момент внешней силы положительны, если при наблюдении с конца оси согласуются с вращением против хода стрелки часов. Разность кинетических моментов частиц МБЛА относительно оси, проходящей через центр масс МБЛА, перпендикулярной плоскости симметрии, в моменты $(t + \Delta t)$ и t равна импульсу главного момента внешних сил, действующих на МБЛА, относительно той же оси за то же время:

$$[(J + \Delta J)(\omega + \Delta\omega) + \Delta mHu] - [J\omega] = M\Delta t,$$

где $u = |u_m|$; ω – угловая скорость вращения малого беспилотного летательного аппарата вокруг оси $C\eta$, рад/с; $\Delta\omega$ – изменение угловой скорости ω за малое время Δt , рад/с; J – текущий момент инерции малого беспилотного летательного аппарата относительно оси $C\eta$, кг·м²; ΔJ – изменение момента инерции J за малое время Δt , кг·м².

После приведения подобных членов, деления обеих частей на Δt и $\Delta t \rightarrow 0$ уравнение примет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dj}{dt} = M - \frac{dm}{dt} Hu,$$

и, полагая, что угловая скорость настолько мала, что ей можно пренебречь, получим:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - \frac{dm}{dt} Hu. \quad (2)$$

Модель программного управления малого беспилотного летательного аппарата

Программное управление движением определяется как управление желаемым движением и находится из решения уравнений движения. Рассмотрим полет МБЛА на заданной высоте над полем по траектории, параллельной линии профиля поля в продольной вертикальной плоскости полета. Полагаем, что программное управление поддерживает траекторный угол МБЛА равным углу наклона линии профиля поля к горизонту. Неподвижную систему координат выберем так, чтобы плоскость Oxz совпала с плоскостью симметрии $C\xi\zeta$. При составлении дифференциальных уравнений плоскопараллельного движения² в инерциальной системе координат Oxz уравнение движения (1) центра масс МБЛА запишем в естественном виде, проецируя ускорение точки и силы на ось касательной, направленную по вектору скорости v центра масс МБЛА, ось нормали к траектории центра масс, направленную в сторону вогнутости траектории. Уравнения движения запишем так:

² Белов М.И., Пылаев Б.В. Теоретическая механика: учеб. пособие. М.: РИОР ИНФРА-М; 2024. 334 с.

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{dv}{dt} = P \cos \alpha - R - \frac{dm}{dt} u \cos \alpha - mg \sin(\theta - \alpha) \\ mv \frac{d(\theta - \alpha)}{dt} = P \sin \alpha + N - \frac{dm}{dt} u \sin \alpha - mg \cos(\theta - \alpha) \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - \frac{dm}{dt} Hu \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{dx}{dt} = v \cos(\theta - \alpha) \\ \frac{dz}{dt} = v \sin(\theta - \alpha), \end{array} \right. \quad (3)$$

где

$$m = \begin{cases} m_0 + m_c, & 0 < x < x_0 \\ m_0 + m_c - q(x - x_0), & x_0 + \frac{m_c}{q} \geq x \geq x_0 \\ m_0, & x > x_0 + \frac{m_c}{q}; \end{cases}$$

$$J = \begin{cases} J_0 + m_c \left[\frac{H}{2} \right]^2, & 0 < x < x_0 \\ J_0 + \left[m_c - q(x - x_0) \right] \left[\frac{H}{2} + \frac{Hq(x - x_0)}{2m_c} \right]^2, & x_0 + \frac{m_c}{q} \geq x \geq x_0 \\ J_0, & x > x_0 + \frac{m_c}{q}; \end{cases}$$

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} 0, & 0 < x < x_0 \\ -qv \cos(\theta - \alpha), & x_0 + \frac{m_c}{q} \geq x \geq x_0 \\ 0, & x > x_0 + \frac{m_c}{q}, \end{cases}$$

где x_0 – координата x в момент начала уменьшения массы МБЛА; m_0, m_c – масса летательного аппарата без рабочего вещества и максимальная масса рабочего вещества ($m_0 \leq m \leq m_0 + m_c$), кг; J_0 – момент инерции малого беспилотного летательного аппарата относительно оси $C\eta$ без рабочего вещества, кг·м².

Уравнения (3) содержат силы P, R, N и пару сил M , выражения для которых определены по экспериментальным данным³. В соответствии с уравнением Бернулли разность Δp давлений воздуха на выходе из пропеллера при скорости воздуха v_0 и на входе в него при скорости воздуха v определяется по формуле:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (v_0^2 - v^2),$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³.

³ Биард Р.У., Маклэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика.

Принимая скорость v_0 воздуха на выходе прямо пропорциональной перемещению δ_p руля тяги, а силу тяги P прямо пропорциональной разности давлений и площади сечения пропеллера, последнюю формулу для двух пропеллеров получим⁴:

$$P = \rho s_p \left[(k_p \delta_p)^2 - v^2 \right]. \quad (4)$$

где s_p – площадь поперечного сечения пропеллера, м²; k_p – коэффициент тяги пропеллера, (м/с)/м; δ_p – перемещение тяги двигателя (дроссельной заслонки), м.

При малых углах тангажа и атаки справедливы следующие выражения для сил сопротивления R , N , M^2 :

$$\begin{cases} N = \frac{1}{2} \rho v^2 s_w (c_N + c_{N\alpha} \alpha + c_{N\delta} \delta) \\ R = \frac{1}{2} \rho v^2 s_w (c_R + c_{R\alpha} \alpha) \\ M = \frac{1}{2} \rho v^2 s_w c \left(c_{M\alpha} \alpha + \frac{c_{M\omega}}{v} \omega + c_{M\delta} \delta \right), \end{cases} \quad (5)$$

где c , c_N , $c_{N\alpha}$, $c_{N\delta}$, c_R , $c_{R\alpha}$, $c_{M\alpha}$, $c_{M\omega}$, $c_{M\delta}$ – экспериментальные коэффициенты; s_w – площадь поперечного сечения крыла, м².

Система уравнений (3) с учетом функций (4), (5) при заданных начальных условиях и заданном законе управления $\delta(t)$, $\delta_p(t)$ является замкнутой и позволяет однозначно определить шесть неизвестных, являющихся переменными состояния: v , ω , α , θ , x , z . Для определения функций управления $\delta(t)$, $\delta_p(t)$ необходимо задать два условия (уравнения). Такими являются уравнение профиля поля или соответствующее ему уравнение траекторного угла и задание скорости центра масс МБЛА. Линию профиля поля с координатами z_f по оси Oz зададим в виде наклонной прямой линии (верхняя формула) или волнистой наклонной линии (нижняя формула) так:

$$z_f = \begin{cases} x \operatorname{tg} \beta \\ x \operatorname{tg} \beta + \frac{h_c \sin \left(\frac{2\pi x}{250} \right)}{10}, \end{cases} \quad (6)$$

где z_f – координата точки профиля поля по оси Oz , м; h_c – заданная высота полета над полем, м.

Два условия (уравнения) по траекторному углу γ и скорости v зададим в виде:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} (\theta - \alpha) = \operatorname{tg} \gamma = \frac{dz}{dx} = \frac{dz_f}{dx} \\ v = v_c = \operatorname{const}, \end{cases} \quad (7)$$

где z_f – функция от x , заданная формулами (6), v_c – заданная скорость, м/с.

Система алгебро-дифференциальных уравнений (3), (7) с учетом (4), (5) состоит из восьми уравнений и позволяет найти шесть переменных состояния и две переменные управления, которые служат программным управлением. Она приводится к линейной системе четырех обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными θ , ω , x , z при заданной постоянной скорости v_c . Действительно, из первого уравнения системы (3) с учетом выражения для R из (5) следует такое равенство:

⁴Там же.

$$P = \frac{mg \sin \beta}{\cos(\theta - \gamma)} + \frac{dm}{dt} u + \frac{1}{2} \frac{\rho v_c^2 s_w [c_R + c_{R\alpha}(\theta - \gamma)]}{\cos(\theta - \gamma)}. \quad (8)$$

Используя формулу (4), найдем δ_p :

$$\delta_p^2 = \frac{\frac{P}{\rho s_p} + v_c^2}{k_p^2}, \quad (9)$$

где P задается формулой (8).

Из выражения (5) для N найдем δ , подставляя в него выражение N из второго уравнения системы (3), в таком виде:

$$\delta = \frac{\frac{2N}{\rho v_c^2 s_w} / -c_N - c_{N\alpha}(\theta - \gamma)}{c_{N\delta}}, \quad (10)$$

$$\text{где } N = \left(\frac{dm}{dt} u - P \right) \sin(\theta - \gamma) + mg \cos \gamma + m v_c \frac{d\gamma}{dx} v_c \cos \gamma.$$

Подставляя δ из (10) и α из (7) в выражение (5) для M , получим такую формулу:

$$M = \frac{1}{2} \rho v_c^2 s_w c \left(c_{M\alpha}(\theta - \gamma) + \frac{c_{M\omega}}{v_c} \omega + c_{M\delta} \delta \right). \quad (11)$$

Отмечаем, что последние четыре уравнения системы (3) с учетом выражений (6)–(11) служат системой дифференциальных уравнений с неизвестными θ , ω , x , z . В установившемся режиме полета на участках с постоянной массой угол тангажа и угол атаки зависят от заданной скорости и массы МБЛА и связаны с ними так:

$$\frac{2mg [\cos \gamma - \sin \gamma \operatorname{tg}(\theta - \gamma)]}{\rho v_c^2 s_w} = c_N + c_{N\alpha}(\theta - \gamma) + \frac{c_{N\delta} c_{M\alpha}(\theta - \gamma)}{c_{M\delta}} + [c_R + c_{R\alpha}(\theta - \gamma)] \operatorname{tg}(\theta - \gamma).$$

Отсюда следует, что установившееся значение угла тангажа совпадает с заданным траекторным углом γ , если скорость рассчитывать по следующей формуле:

$$v_c = \sqrt{\frac{2mg \cos \gamma}{c_N \rho s_w}}. \quad (12)$$

Модель траекторного управления малым беспилотным летательным аппаратом

Программное управление предполагает, что истинный рельеф поля описывается заданной функцией, начальные моделируемые и реальные условия совпадают, погрешность модели отсутствует. Ввиду расхождений по всем позициям программное управление эффективно, если имеются основания считать такие расхождения незначимыми. Вместо уравнений (7) зададим управления в виде:

$$\delta = b_1(\theta - \beta) + b_2 \omega + c_1(z - z_f - h_c) + c_2 \int_0^t (z - z_f - h_c) dt, \quad (13)$$

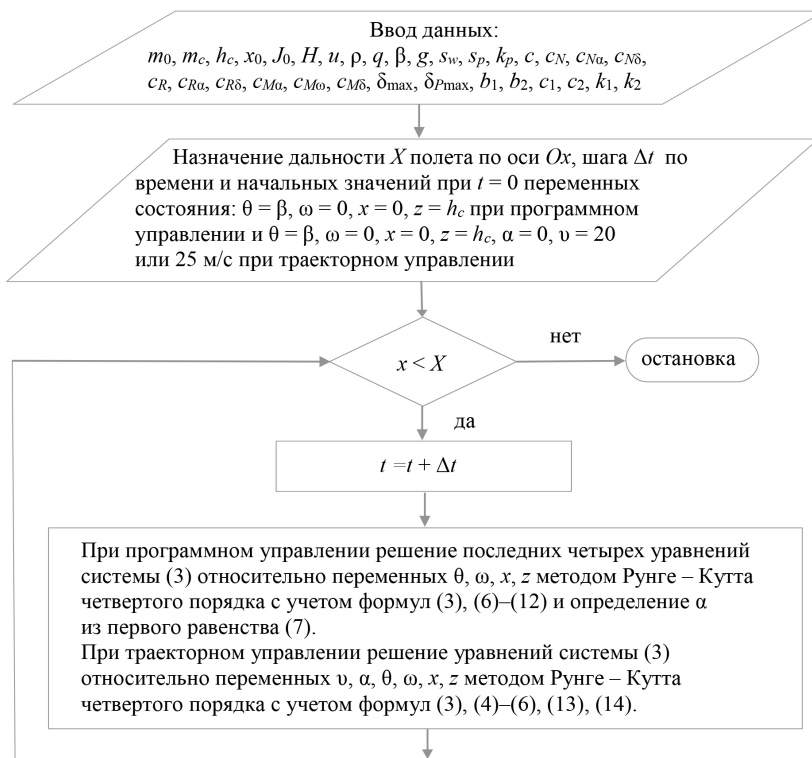
$$\delta_p = k_1(v_a - v) + k_2 \int_0^t (v_a - v) dt, \quad (14)$$

где $b_1, b_2, c_1, c_2, k_1, k_2$ – задаваемые коэффициенты ПИ регулятора для управления рулем высоты и дроссельной заслонкой (тягой двигателя); z_f – функция (6); v_a – заданное значение скорости.

Вопрос обоснования коэффициентов $b_1, b_2, c_1, c_2, k_1, k_2$ не рассматривался. Коэффициенты оценивались так, чтобы значения переменных управления не превышали заданных рабочих пределов δ_{\max} по углу поворота руля высоты и $\delta_{P\max}$ по перемещению дроссельной заслонки (тяги двигателя). Технология подобной оценки приведена, например, в упомянутой выше работе Р. У. Биарда и Т. У. Маклэйна⁵. В равенствах (13), (14) предполагается, что значения высоты полета, угла тангажа, угловой скорости и скорости, регистрируемые датчиками и рассчитываемые по уравнениям движения МБЛА, совпадают. Шесть уравнений (3) после подстановки в них выражений (13), (14) для переменных управления содержат все шесть переменных состояния и при заданных начальных значениях переменных и коэффициентах могут быть решены. Уравнения (3) с учетом уравнений (4)–(7), (13), (14) рассматриваются как модель траекторного управления.

Алгоритм расчета высоты и скорости

Алгоритм представим в виде блок-схемы (рис. 4).



Р и с. 4. Упрощенная блок-схема расчета высоты полета в моделях программного и траекторного управления

⁵ Биард Р.У., Маклэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика.

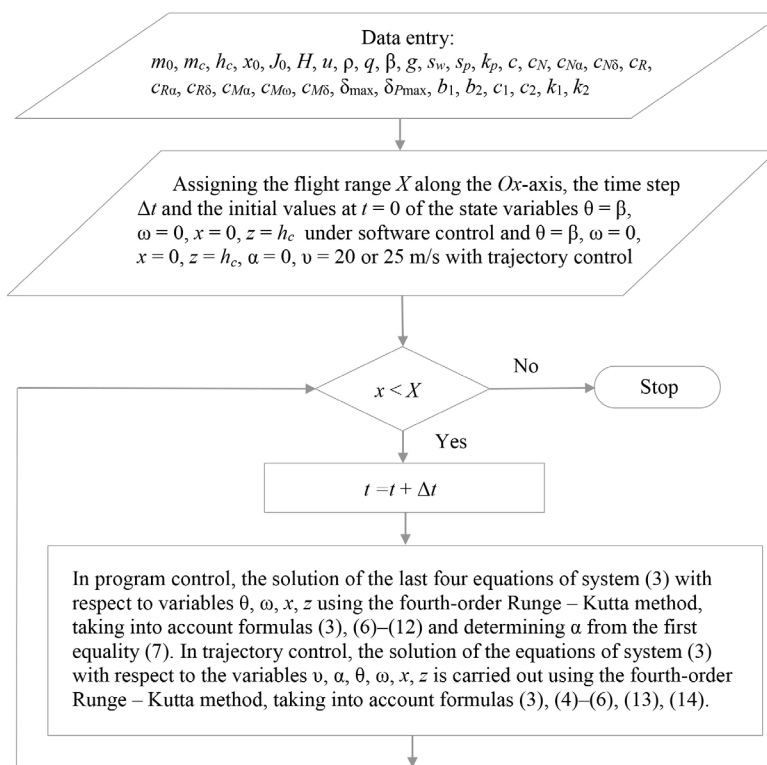


Fig. 4. Simplified flow chart for calculating flight altitude in software and trajectory control models

Компьютерное моделирование

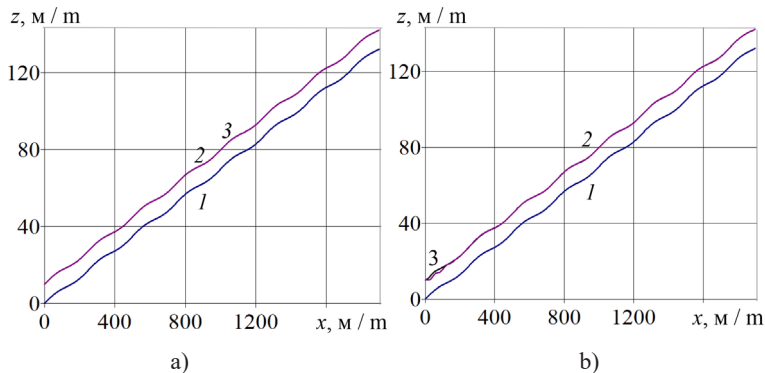
Алгоритм определения значений высоты и скорости был реализован в среде программирования Lazarus и в визуальной среде моделирования XCOS Scilab при следующих исходных данных⁶ $m_0 = 13,5$ кг; $m_c = 5$ кг; $h_c = 10$ м; $x_0 = 600$ м; $J_0 = 1,135$ кг м²; $H = 0,035$ м; $u = 2,5$ м/с; $\rho = 1,27$ кг/м³; $q = 0,007$ кг/м; $\beta = 4$ град; $g = 9,8$ м/с²; $s_w = 0,55$ м²; $s_p = 0,11$ м²; $k_p = 80$ (м/с)/м; $c = 0,19$ м; $c_N = 0,8$; $c_{Na} = 3,45$; $c_{Nb} = -0,36$; $c_R = 0,03$; $c_{Ra} = 0,3$; $c_{Ma} = -0,38$; $c_{Mo} = -3,6$; $c_{Mδ} = -0,5$; $\delta_{\max} = \pi/3$; $\delta_{p\max} = 0,04$ м; $b_1 = \pi/3$ рад/рад; $b_2 = \pi/60$ (рад·с)/рад; $c_1 = 0,2$ рад/м; $c_2 = 0,025$ рад/(м·с); $k_1 = \delta_{p\max}/10$ (м·с)/м; $k_2 = \delta_{p\max}/80$ м/м.

Программное и траекторное управления позволили стабилизировать высоту полета над полем с прямолинейным и волнистым рельефом, моделируемым уравнениями (6) (рис. 5).

В случае прямолинейного рельефа траектория центра масс МБЛА становится прямой линией, параллельной линии рельефа. Расчеты и моделирование показали, что программное управление обеспечило стабилизацию скорости и высоты полета над полем с любым рельефом. Изменение полетной массы при

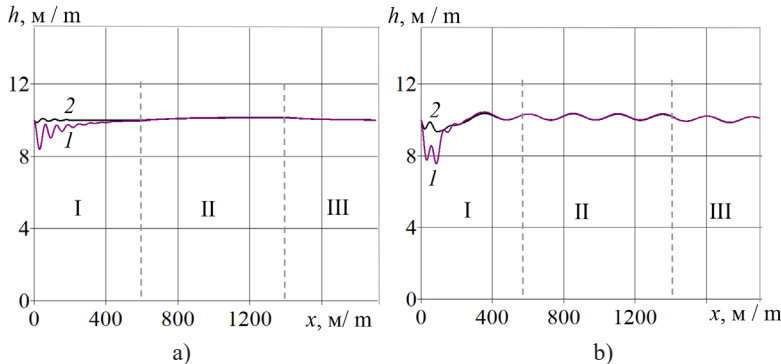
⁶ Биард Р.У, Маклэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика.

траекторном управлении не изменило высоту полета, если к началу рабочего процесса, во время которого полетная масса начинала уменьшаться, высота стабилизировалась (рис. 6 а).



Р и с. 5. Зависимости от координаты x координаты z (высоты над уровнем моря) точек линии волнистого профиля поля 1 и центра масс малого беспилотного летательного аппарата при программном (а) и траекторном (б) управлении при полете с заданной скоростью: 2 – 20 м/с; 3 – 25 м/с

Fig. 5. Depending on the x coordinate of the z coordinate (altitude above sea level) of the points of the wavy profile line of field 1 and the center of mass of a small unmanned aerial vehicle with software (a) and trajectory (b) control when flying at a set speed: 2 – 20 m/s; 3 – 25 m/s



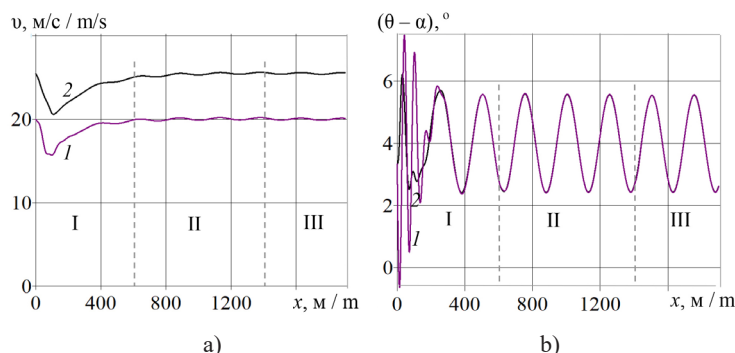
Р и с. 6. Зависимости высоты полета h над полем с прямолинейным наклонным профилем (а) и волнистым наклонным профилем (б) от координаты x при траекторном управлении и заданной скорости: 1 – 20 м/с; 2 – 25 м/с

Fig. 6. Dependence of the flight altitude h above a field with a straight inclined profile (a) and a wavy inclined profile (b) on the coordinate x with trajectory control and a given speed: 1 – 20 m/s; 2 – 25 m/s

Примечания: I – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна; II – масса малого беспилотного летательного аппарата уменьшается; III – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна.

Note: I – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant; II – the mass of the small unmanned aerial vehicle decreases; III – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant.

При прямолинейном наклонном профиле поля траекторное управление позволило стабилизировать высоту на заданном уровне. При волнистом профиле поля отклонения точек поля на расстояние 1 м от средней линии профиля привело к отклонению высоты от заданного значения не более чем на 20 см (рис. 6 б). Уменьшение полетной массы МБЛА на втором участке полета не повлияло на его скорость (рис. 7 а) и траекторный угол (рис. 7 б) при траекторном управлении высотой и скоростью полета.



Р и с. 7. Изменение скорости центра масс малого беспилотного летательного аппарата (а) и траекторного угла (б) с изменением перемещения x при траекторном управлении полетом над полем с волнистым наклонным профилем при заданной скорости: 1 – 20 м/с; 2 – 25 м/с

Fig. 7. Change in the speed of the center of mass of the small unmanned aerial vehicle (a) and the trajectory angle (b) with a change in the displacement x at trajectory control over a field with a wavy inclined profile and a given speed: 1 – 20 m/s; 2 – 25 m/s

Примечание: I – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна; II – масса малого беспилотного летательного аппарата уменьшается; III – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна.

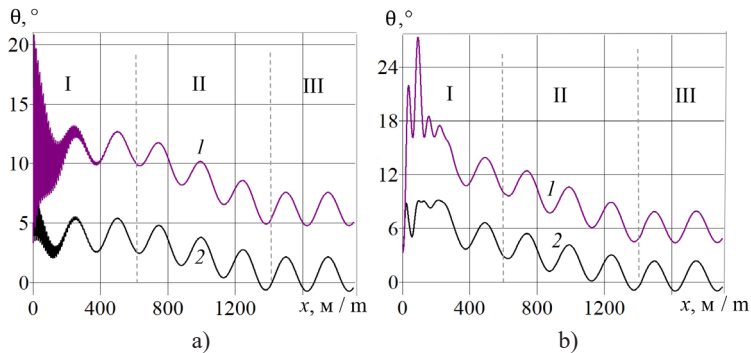
Note: I – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant; II – the mass of the small unmanned aerial vehicle decreases; III – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant.

Расчеты показали, что уменьшение полетной масса МБЛА на участке II приводило к значительному уменьшению угла тангажа (рис. 8).

Угол тангажа также трансформировался вместе с изменениями профиля поля относительно средней линии. Колебания уровня поля относительно средней линии приводят к колебаниям угла тангажа и тем самым угла поворота корпуса вокруг поперечной оси, амплитуда которых заметно не изменялась с уменьшением полетной массы МБЛА. При полете над участками I, III поля с прямым наклонным рельефом, на которых полетная масса МБЛА не изменялась, траекторное управление обеспечивало неизменный угол тангажа и неизменную скорость (рис. 9, линия 1).

Компьютерное моделирование позволило выявить опасные условия и режимы управления полетом на спусках с отрицательным углом наклона средней линии профиля поля: траекторное управление МБЛА при большой заданной скорости на участках (более 20 м/с) с уменьшением полетной массы привело к уменьшению угла тангажа до отрицательных значений с потерей управления (рис. 9, линия 2). При скорости 20 м/с и ниже траекторное управление обеспечивает стабилизацию скорости и высоты над полем с плоским рельефом без наклона вниз. При волнистом

профиле поля отклонения точек поля на расстояние 1 м от средней линии профиля приводит к отклонению высоты от заданного значения не более чем на 20 см.



Р и с. 8. Зависимости угла тангажа θ от перемещения x центра масс малого беспилотного летательного аппарата при программном управлении (а) и траекторном управлении (б) полетом над полем с волнистым наклонным профилем со скоростью:

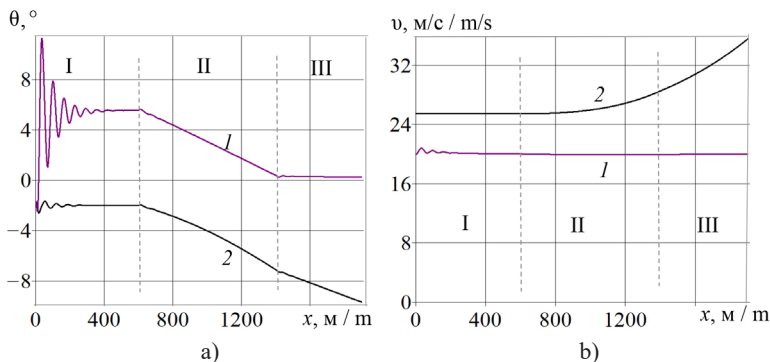
1 – 20 м/с; 2 – 25 м/с

Fig. 8. Dependences of the pitch angle θ on the displacement x of the center of mass of the small unmanned aerial vehicle with program control (a) and trajectory control (b) of flight over a field with a wavy inclined profile at a speed:

1 – 20 m/s; 2 – 25 m/s

Примечание: I – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна; II – масса малого беспилотного летательного аппарата уменьшается; III – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна.

Note: I – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant; II – the mass of the small unmanned aerial vehicle decreases; III – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant.



Р и с. 9. Зависимости угла тангажа (а) и скорости (б) от перемещения x центра масс малого беспилотного летательного аппарата при траекторном управлении полетом над полем с прямым профилем под углом к горизонтальной плоскости 2° при заданной скорости:

1 – 20 м/с; 2 – 25 м/с

Fig. 9. Dependences of the pitch angle (a) and speed (b) on the displacement x of the center of mass of the small unmanned aerial vehicle with trajectory control of the flight over a field with a straight profile at an angle to the horizontal plane of 2° at a given speed:

1 – 20 m/s; 2 – 25 m/s

Примечание: I – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна; II – масса малого беспилотного летательного аппарата уменьшается; III – масса малого беспилотного летательного аппарата постоянна.

Note: I – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant; II – the mass of the small unmanned aerial vehicle decreases; III – the mass of the small unmanned aerial vehicle is constant.

Решением проблемы потери управления при спуске над участком с уклоном может стать изменение курса полета таким образом, чтобы полет осуществлялся без спуска.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показали, что программное управление рулем высоты и тягой двигателя МБЛА позволяет стабилизировать высоту полета и скорость МБЛА с переменной массой при прямом и волнистом рельефе поля. Программное управление при его высокой точности требует значительных вычислительных ресурсов для решения уравнений и обработки информации с высоким быстродействием, которые препятствуют реализации такого управления из-за недостаточных вычислительных ресурсов микроконтроллеров. Точность расчетов высоты и скорости летательного аппарата связана с точностью математической модели, и без обратной связи с реальными данными полета нельзя оценить истинную точность расчетов высоты полета и скорости летательного аппарата. Поэтому траекторное управление с пропорционально-интегральным регулятором, позволяющее учитывать обратные связи, можно признать надежным способом поддержания высоты летательного аппарата на заданном уровне. Однако такой способ управления даже с рациональными коэффициентами усиления регулятора не позволяет «устранить» отклонение высоты полета от заданной, обусловленное инерцией летательного аппарата. Это наглядно проявилось при изучении траектории полета над полем с переменным рельефом, аппроксимируемым волнистой (синусоидальной) линией. При большой скорости такие отклонения приводят к потере устойчивости и падению летательного аппарата. Проведенные исследования показали, что при полетах над полем с переменным и наклонным рельефом важное значение имеет устойчивость полета. Как показали расчеты, уменьшение массы летательного аппарата во время полета над полем с плоским рельефом с уклоном вниз может привести к потере устойчивости и его падению. Уменьшение полетной массы беспилотного летательного аппарата необходимо учитывать при использовании таких аппаратов в сельском хозяйстве для обработки поля от вредителей. При выполнении работ на участках с уклоном не рекомендуется движение на заданной высоте в направлении понижения участка. Направление полета целесообразно выбирать таким, в котором участок не понижается. Поле с переменным рельефом содержит участки, на которых уровень понижается, служит источником некомфортного полета и потери устойчивости полета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ударцева О.В. Исследование различных технологий внесения пестицидов, используемых на территории алтайского края. *Фундаментальные исследования*. 2011;(8):185–187. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=26809> (дата обращения: 09.08.2025).
2. Салаев Б.К., Серёгин А.А., Эвиев В.А., Мучаев А.Б., Глечикова Н.А., Юдаев И.В. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. *Вестник аграрной науки Дона*. 2022;15(4):29–44. https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_4_29-44
3. Курченко Н.Ю., Даус Ю.В., Туфляк Е.В., Ильченко Я.А. Параметры применения беспилотных летательных аппаратов при обработке средствами защиты растений сельскохозяйственных культур. *Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса*. 2023;(1):527–536. URL: <https://clck.ru/3QH2Bd> (дата обращения: 09.08.2025).

4. Кузнецов А.Г. Автоматизация процесса посадки малогабаритного беспилотного летательного аппарата в особых ситуациях. *Труды МАИ*. 2011;(45):25425. URL: <https://trudymai.ru/published.php/published.php?ID=25425> (дата обращения: 09.08.2025).
5. Архипов А.В., Тимошенков С.П. Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2022;27(5):652–663. <https://elibrary.ru/wdjbyi>
6. Ахрамович С.А., Баринов А.В., Малышев В.В., Старков А.В. Синтез системы управления беспилотного летательного аппарата по высоте методом бэкстеппинга. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2018;17(2):7–22. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-2-7-22>
7. Усачов В.Е., Таргамадзе Р.Ч. Принципы и алгоритмы формирования системы математических моделей целевой миссии беспилотного ЛА. *Труды МАИ*. 2011;(49):28282. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28282> (дата обращения: 29.01.2025).
8. Карпунин А.А., Титков И.П. Упрощение и линеаризация математической модели движения беспилотных летательных аппаратов в пространстве и в вертикальной плоскости. *Современные наукоемкие технологии*. 2019;(2):69–77. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37411> (дата обращения: 29.01.2025).
9. Потудинский А.В. Адаптивная конфигурация контроллера нечеткой логики динамики полета беспилотного летательного аппарата. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(4):1466. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.021>
10. Anderson E.P., Beard R.W., McLain T.W. Real-Time Dynamic Trajectory Smoothing for Unmanned Air Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005;13(3):471–477. <https://doi.org/10.1109/TCST.2004.839555>
11. Rauf M.N., Khan R.A., Ali Shah S.I., Naqvi M.A. Design and Analysis of Stability and Control for a Small Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Dynamics and Control*. 2024;12:1801–1816. <https://doi.org/10.1007/s40435-023-01322-2>
12. Фам С.Ч., Суркова А.Д., Селезнева М.С. Исследование системы маршрутной коррекции бортовой навигационной системы беспилотного летательного аппарата по радиолокационным изображениям местности. *Автоматизация. Современные технологии*. 2020;74(3):129–134. <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2020-74-3-129-134>
13. Лобатый А.А., Бумай А.Ю., Авсиевич А.М. Формирование траектории беспилотного летательного аппарата при облете запретных зон. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2021;(4):47–53. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2021-4-47-53>
14. Белов Н.В., Репинский В.Н. Моделирование полета беспилотного летательного аппарата в Matlab Simulink. *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023;17(6):37–47. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-6-37-47>
15. Velasco J., Garcia-Nieto S., Simarro R., Sanchis J. Control Strategies for Unmanned Aerial Vehicles under Parametric Uncertainty and Disturbances: A Comparative Study. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(9):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.050>
16. Trung V.A., Hong S.T., Dinh-dung N., Truong-thanh N., Trong-son P., Hong T.N. An Investigation of the Control Quality of the Automatic Control System for Fixed-wing UAVs During Landing Process. *International Journal of Aviation Science and Technology*. 2022;3(2):61–69. <https://doi.org/10.23890/IJAST.vm03is02.0201>
17. Admas Y.A., Mitiku H.M., Salau A.O., Omeje C.O., Braide S.L. Control of a Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle Using a Higher-Order Sliding Mode Controller and Non-Linear PID Controller. *Scientific Reports*. 2024;14(1):23139. URL: <https://d-nb.info/1351765469/34> (дата обращения: 02.02.2025).
18. Rominiyi O.L., Salau A.O., Adaramola B.A., Ogunlade M.A., Olanibi T.O., Akintoye F.A. Development of a Precision Agricultural Based Unmanned Aerial Vehicle for Pest Control. In: *International Conference on Cyber Management and Engineering (CyMaEn)*. 2023. P. 439. <https://doi.org/10.1109/CyMaEn57228.2023.10051014>

REFERENCES

1. Udartseva O.V. Investigation of Various Technologies of Pesticides Used in the Altai Territory. *Fundamental Research*. 2011;(8):185–187. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=26809> (accessed 09.08.2025).
2. Salaev B.K., Seregin A.A., Eviev V.A., Muchaev A.B., Glechikova N.A., Yudaev I.V. Analysis of Using Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2022;15(4):29–44. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_4_29-44
3. Kurchenko N.Yu., Daus Yu.V., Truflyak E.V., Ilchenko Ya.A. Parameters of the Use of Unmanned Aerial Vehicles in the Processing of Crop Protection Products. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023;(1):527–536. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3QH2Bd> (accessed 09.08.2025).
4. Kuznecov A.G. [Automation of the Landing Process of a Small-Sized Unmanned Aerial Vehicle in Special Situations]. *Trudy MAI*. 2011;(45):25425. (In Russ.) Available at: <https://trudymai.ru/published.php/published.php?ID=25425> (accessed 09.08.2025).
5. Arhipov A.V., Timoshenkov S.P. Application of Adaptive Controllers in Control Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings of Universities. Electronics*. 2022;27(5):652–663. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/wdjbyi>
6. Akhramovich S.A., Barinov A.V., Malyshev V.V., Starkov A.V. Backstepping Synthesis of the Height Control System of an Unmanned Aerial Vehicle. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018;17(2):7–22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-2-7-22>
7. Usachov V.E., Targamadze R.C. [Principles and Algorithms for the Formation of a System of Mathematical Models for the Target Mission of an Unmanned Aerial Vehicle]. *Trudy MAI*. 2011;(49):28282. (In Russ.) Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28282> (accessed 29.01.2025).
8. Karpunin A.A., Titkov I.P. Simplification and Linearization of the Mathematical Model of the Motion of the Unlimited Aircraft in Space and in the Vertical Plane. *Modern High Technologies*. 2019;(2):69–77. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37411> (accessed 29.01.2025).
9. Potudinskiy A.V. Adaptive Configuration of the Fuzzy Logic Controller of Unmanned Aerial Vehicle Flight Dynamics. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4):1466. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.021>
10. Anderson E.P., Beard R.W., McLain T.W. Real-Time Dynamic Trajectory Smoothing for Unmanned Air Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005;13(3):471–477. <https://doi.org/10.1109/TCST.2004.839555>
11. Rauf M.N., Khan R.A., Ali Shah S.I., Naqvi M.A. Design and Analysis of Stability and Control for a Small Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Dynamics and Control*. 2024;12:1801–1816. <https://doi.org/10.1007/s40435-023-01322-2>
12. Fam S.Ch., Surkova A.D., Selezneva M.S. Study of the Route Correction System for the On-Board Navigation System of an Unmanned Aerial Vehicle on the Grounds of Radar Images of the Terrain. *Automation. Modern Technologies*. 2020;74(3):129–134. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36652/0869-4931-2020-74-3-129-134>
13. Lobaty A.A., Bumai A.Y., Avsievich A.M. Formation of Unmanned Aircraft Trajectory when Flying Around Prohibited Areas. *System Analysis and Applied Information Science*. 2021;(4):47–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2021-4-47-53>
14. Belov N.V., Repinsky V.N. Simulation of an Unmanned Aircraft Flight in Matlab Simulink. *T-Comm*. 2023;17(6):37–47. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-6-37-47>
15. Velasco J., Garcia-Nieto S., Simarro R., Sanchis J. Control Strategies for Unmanned Aerial Vehicles under Parametric Uncertainty and Disturbances: A Comparative Study. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(9):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.050>
16. Trung V.A., Hong S.T., Dinh-dung N., Truong-thanh N., Trong-son P., Hong T.N. An Investigation of the Control Quality of the Automatic Control System for Fixed-wing UAVs During Landing Process.

International Journal of Aviation Science and Technology. 2022;3(2):61–69. <https://doi.org/10.23890/IJAST.vm03is02.0201>

17. Admas Y.A., Mitiku H.M., Salau A.O., Omeje C.O., Braide S.L. Control of a Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle Using a Higher-Order Sliding Mode Controller and Non-Linear PID Controller. *Scientific Reports*. 2024;14(1):23139. Available at: <https://d-nb.info/1351765469/34> (accessed 02.02.2025).
18. Rominiyi O.L., Salau A.O., Adaramola B.A., Ogunlade M.A., Olanibi T.O., Akintoye F.A. Development of a Precision Agricultural Based Unmanned Aerial Vehicle for Pest Control. In: International Conference on Cyber Management and Engineering (CyMaEn). 2023. P. 439. <https://doi.org/10.1109/CyMaEn57228.2023.10051014>

Об авторах:

Белов Михаил Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Института механики и энергетики Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, Researcher ID: T-5622-2018, Scopus ID: 57212563127, SPIN-код: 4508-0008, belov@rgau-msha.ru

Андреев Сергей Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Института механики и энергетики Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>, Scopus ID: 57212200432, SPIN-код: 8453-6024, energo-andreev@rgau-msha.ru

Шабает Евгений Адимович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Института механики и энергетики Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, Researcher ID: LPQ-6601-2024, Scopus ID: 57222152508, SPIN-код: 8703-7961, e.shabaev@rgau-msha.ru

Кабдин Николай Егорович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Института механики и энергетики Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>, Scopus ID: 57224401953, SPIN-код: 7014-5110, energo-nek@rgau-msha.ru

Белов Дмитрий Владимирович, ассистент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Института механики и энергетики Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>, SPIN-код: 6722-9029, dmitri.belov@rgau-msha.ru

Вклад авторов:

М. И. Белов – формулирование идеи исследования, целей и задач; проектирование методологии исследования; создание математических и компьютерных моделей программного и траекторного управления; разработка алгоритмов и программ решения уравнений; 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. А. Андреев – формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка модели траекторного управления; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Е. А. Шабает – анализ существующих систем управления малыми беспилотными летательными аппаратами; разработка модели траекторного управления.

Н. Е. Кабдин – разработка модели программного управления; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Д. В. Белов – компьютерное моделирование в среде Scilab XCOS.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 10.03.2025; поступила после рецензирования 02.09.2025;
принята к публикации 18.09.2025*

About the authors:

Mikhail I. Belov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin of the Institute of Mechanics and Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, Researcher ID: T-5622-2018, Scopus ID: 57212563127, SPIN-code: 4508-0008, belov@rgau-msha.ru

Sergey A. Andreev, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin of the Institute of Mechanics and Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>, Scopus ID: 57212200432, SPIN-code: 8453-6024, energo-andreev@rgau-msha.ru

Evgeny A. Shabaev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin of the Institute of Mechanics and Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, Researcher ID: LPQ-6601-2024, Scopus ID: 57222152508, SPIN-code: 8703-7961, e.shabaev@rgau-msha.ru

Nickolai E. Kabdin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin of the Institute of Mechanics and Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>, Scopus ID: 57224401953, SPIN-code: 7014-5110, energo-nek@rgau-msha.ru

Dmitry V. Belov, Assistant Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I. F. Borodin of the Institute of Mechanics and Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>, SPIN-code: 6722-9029, dmitri.belov@rgau-msha.ru

Authors contribution:

M. I. Belov – formulating the study idea, goals and objectives; designing the study methodology; creating mathematical and computer models of software and trajectory control; developing algorithms and programs for solving equations; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by members of the research group, including at the stages before and after publication.

S. A. Andreev – formulating the study idea, goals and objectives; developing a trajectory management model; preparing a manuscript: visualization of research results and data obtained.

E. A. Shabaev – analyzing existing control systems for small unmanned aerial vehicles; developing a trajectory control model.

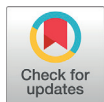
N. E. Kabdin – developing a software management model; preparing the manuscript: visualization of the study results and data obtained.

D. V. Belov – computer modeling in Scilab XCOS.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 10.03.2025; revised 02.09.2025; accepted 18.09.2025

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.723-749>

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

УДК / UDK 574:633/635

Оригинальная статья / Original article

Оценка экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве

Н. И. Джаббаров¹, А. В. Добринов^{1✉}, А. П. Савельев²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства –
филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,

г. Саранск, Российская Федерация

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Усиление антропогенного воздействия технических средств приводит к нарушению устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве, что в целом оказывает негативное влияние на существующий агроландшафт. В связи со значительным количеством отдельных экологических показателей оценка на устойчивость технологических процессов проводится как правило без ранжирования их значимости, не учитывая природно-климатические особенности, которые в значительной степени оказывают влияние на систему производства сельскохозяйственной продукции. При этом не выработан необходимый подход, который бы позволил комплексно произвести оценку устойчивости с высокой степенью достоверности.

Цель исследования. Обосновать критерии и предложить оценку технологических процессов в растениеводстве по степени их экологической устойчивости и стабильности.

Материалы и методы. Исследование базировалось на применении аналитических методов и обобщении научных результатов, полученных различными авторами. Метод статистического моделирования процессов позволил выявить их закономерность, определить и обоснованно выбрать весомые факторы, влияющие на устойчивость и стабильность процессов.

Результаты исследования. Разработаны частные и интегральные критерии оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве. Приведены примеры расчета критериев и дана оценка экологической устойчивости и стабильности технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву. Обоснована шкала оценки технологических процессов по значениям интегрального критерия оценки. По степени экологической

© Джаббаров Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П., 2025



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

устойчивости технологические процессы предложено разделить на устойчивые, среднеустойчивые, неустойчивые и с высокой энтропией.

Обсуждение и заключение. Предложенные авторами критерии оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве в дальнейшем можно использовать при разработке мобильных приложений, платформ и логистических решений для повышения эффективности отрасли, производительности труда, улучшения качества продукции и т. д.

Ключевые слова: растениеводство, технологические процессы, экологическая устойчивость, экологическая стабильность, критерии оценки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Джаббаров Н.И., Добринов А.В., Савельев А.П. Оценка экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):723–749. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.723-749>

Assessment of Environmental Sustainability and Stability of Crop Production Technological Processes

N. I. Jabborov^a, A. V. Dobrinov^a ✉, A. P. Savelyev^b

^a Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation

^b National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Abstract

Introduction. The increased anthropogenic impact of technological tools leads to a violation of the environmental sustainability and stability of crop production technological processes that has a negative effect on the existing agrarian landscape. Because of a significant number of single environmental indicators, the assessment of the environmental sustainability of technological processes is usually carried out without ranking their significance and without taking into account individual natural and climatic characteristics that significantly affect the agricultural production system. At the same time, there has not been developed a necessary approach for assessing the environmental sustainability with a high measure of reliability.

Aim of the Study. The study is aimed at justifying the criteria and proposing an assessment of the degree environmental sustainability and stability of technological processes in crop production.

Materials and Methods. The study was based on the use of analytical methods and the synthesis of scientific results obtained by various authors. There was employed statistic modeling of processes that made it possible to identify the patterns of these processes, determine and reasonably choose significant factors influencing the environmental sustainability and stability of the processes.

Results. There have been developed partial and integral criteria for assessing environmental sustainability and stability of crop production technological processes. There are given the examples of criteria calculation and the assessment of environmental sustainability and stability of the technological processes of transportation and application of liquid organic fertilizers to the soil. There has been substantiated the scale of assessment of technological processes based on the values of the integral evaluation criterion. According to the environmental sustainability degree, the authors propose to divide technological processes into stable, medium-stable, unstable and with high entropy.

Discussion and Conclusion. The authors proposed criteria for assessing environmental sustainability and stability in crop production technological processes, which can be used for developing mobile apps, platforms, and logistics solutions to improve industry efficiency, labor productivity, product quality, etc.

Keywords: crop production, technological processes, environmental sustainability, environmental stability, evaluation criteria

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

For citation: Jabborov N.I., Dobrinov A.V., Savelyev A.P. Assessment of Environmental Sustainability and Stability of Crop Production Technological Processes. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):723–749. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.723-749>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие сельскохозяйственного производства должно быть направлено на повышение экологической устойчивости как агропромышленного комплекса в целом, так и отдельных его предприятий. Обеспечение экологически устойчивого производства сельскохозяйственной продукции, связанное с задачами экономического и социального благополучия, а также энерго-ресурсоснабжения отрасли представляет собой актуальную проблему.

Оценке устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных ученых, обобщение результатов которых позволяет сформулировать понятия экологической устойчивости (или точности) и стабильности технологических процессов. С экологической точки зрения устойчивость может рассматриваться как способность процесса сохранять равновесие или постоянство его экологических показателей под нагрузкой и быстро восстанавливаться при ее снятии, а стабильность процессов характеризуется возможностью противостоять воздействиям внешних возмущающих факторов, т. е. непрерывно (во времени) поддерживать устойчивость.

Устойчивость предприятия оценивается различными критериями, в число которых входят экономические, правовые, социальные, организационные, экологические, маркетинговые и качественные показатели. Многокритериальная оценка обеспечит устойчивое развитие предприятия в условиях экономической неопределенности [1].

Анализ опубликованных результатов исследований показывает, что усиление антропогенного воздействия технологий и технических средств приводит к нарушению устойчивости и стабильности агроэкосистем. При оценке экологической устойчивости и стабильности технологических процессов применяются различные подходы с использованием многочисленных показателей зачастую без обоснования их важности (или весомости) для конкретных зональных условий возделывания сельскохозяйственных культур. Отсутствует единый универсальный метод оценки устойчивости и стабильности технологических процессов.

Настоящее исследование помогает усовершенствовать теоретические основы и практические приемы оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве.

Цель исследования – разработать критерии и шкалу оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве.

Задачи исследования:

- 1) анализ методов и показателей оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов, технологий производства сельскохозяйственной продукции;
- 2) обоснование критериев устойчивости, стабильности и определение допустимых значений экологических показателей процессов;
- 3) определение интегральных критериев оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов, обеспечивающих их эколого-экономическую эффективность и качество производимой продукции.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Устойчивое развитие агропромышленного комплекса основано на трех ключевых компонентах: окружающая среда, общество, экономика. Эти компоненты взаимодополняемы, что позволяет осуществлять управление физическим, природным и человеческим капиталом.

Основные индикаторы устойчивого развития региона: доля использованных и обезвреженных отходов, загрязненных сточных вод в общем объеме сбросов; интенсивность образования отходов и выбросов на единицу валового регионального продукта; площадь особо охраняемых природных территорий; использование расчетной лесосеки; объем инвестиций в охрану окружающей среды; истощение природного капитала [2].

При оценке экологической устойчивости сельских населенных мест необходим всесторонний учет экономических, социальных, технических и экологических аспектов на разных стадиях развития района, повышение значимости энергосбережения и внедрение элементов концепции «умный город». При этом можно использовать экспертный и вероятностный методы оценки рисков и выявления значимых параметров. Система критериев оценки включает в себя архитектурно-планировочные (эффективность использования площади, энергоэффективная застройка, качество транспортных систем и др.), социально-экономические (социальная и коммерческая инфраструктуры, защита от шума, экономическая инфраструктура, трудовая занятость и др.), инженерно-технические (энергосбережение, материалоемкость, обращение с отходами и т.д.) и экологические (экологическая емкость, репродуктивная способность территории, биоразнообразие и др.) показатели [3].

Параметры устойчивости: площадь угодий, природная продуктивность пашни, неоднородность почвенного покрова, ландшафтные условия производства, сумма активных температур, содержание гумуса, запасы продуктивной влаги и др.¹

При оценке экологической устойчивости окружающей среды в Волгоградской области применяются следующие критерии: загрязнение атмосферного воздуха и поверхности вод, использование земель, антропогенная нагрузка [4]. Степень экологической устойчивости районов ранжированы таким образом: устойчивые (0,94–1,00), относительно устойчивые (0,88–0,94), среднеустойчивые (0,65–0,88) и неустойчивые (0–0,65) [4].

¹ Евтушкова Е.П., Брянцева Д.И. Оценка экологической устойчивости земель сельскохозяйственного назначения Сорокинского района Тюменской области. В: Перспективные разработки и прорывные технологии в АПК: сб. материалов нац. науч.-практ. конф. Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья; 2020. С. 18–25. <https://elibrary.ru/becshg>

При определении экологической устойчивости агроландшафтов рассматриваются два подхода: с применением интегрального показателя – коэффициента экологической стабилизации, а также с учетом оптимальной структуры угодий, теоретически установленной и проверенной на практике для каждой конкретной агроландшафтной зоны. Главным фактором, стабилизирующим экологическое состояние агроландшафтных территорий в пределах лесостепной зоны севера Приволжской возвышенности, предложено считать степень залесенности [5].

Разработана система показателей оценки экологической устойчивости сельских территорий, приведен пример формирования интенсивных машинных технологий производства животноводческой продукции для свиноводческого комплекса [6]. Предложенная система показателей позволяет определить состояние атмосферы и спрогнозировать его изменение.

В отрасли машиностроения при оценке стабильности механической обработки применяют коэффициент вариации v_x [7], представляющий собой отношение среднего квадратического отклонения σ_x параметра x к его среднему значению \bar{x} :

$$v_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}.$$

При $v_x \leq 0,170$ (высокая однородность параметра) v_x принадлежит интервалу $0,170-0,333$ (удовлетворительная однородность параметра). Технологический процесс считается стабильным. При $v_x > 0,333$ (неоднородность параметра) технологический процесс считается нестабильным [7].

Экологическая оценка сельскохозяйственных земель в Казахстане, проведенная с применением геоинформационной системы-технологий и цифровых карт-схем, включила расчет коэффициентов стабильности и антропогенной нагрузки [8]. Полученные результаты свидетельствуют о нерациональном использовании земельного фонда и его высокой антропогенной нагрузке. При этом процессы эрозии и дефляции почвы, несбалансированность соотношения сельскохозяйственных угодий делают территорию экологически нестабильной.

Оценке технологической устойчивости сельскохозяйственных агрегатов посвящена работа ученых Санкт-Петербургского государственного аграрного университета [9]. Под технологической устойчивостью процесса ученые понимают вероятность P_n того, что время t функционирования процесса не превышает время T_n :

$$P_n(t) = P\left\{P_{\Delta} \geq |P_{\Delta}|_{\text{доп}}; T_n \geq t\right\},$$

где T_n – время, когда оцениваемый показатель превышает допускаемый предел $|P_{\Delta}|_{\text{доп}}$; P_{Δ} – относительная длительность нахождения оценочного показателя в поле заданного допуска.

Точность (или устойчивость) технологического процесса показывает, какая часть поля допускаемой зоны изменения оценочного показателя покрывается ее рассеянием. При этом коэффициент устойчивости (точности) процесса относительно номинального значения K_u определяется по формуле²:

² Статистический анализ погрешностей механической обработки методом больших выборок: методические указания по выполнению практической работы. Сост. Е. И. Яцун; ЮЗГУ. Курск; 2017. 26 с.

$$K_u = \frac{d}{X_n},$$

где d – погрешность показателя процесса; X_n – номинальное значение параметра.

Коэффициент устойчивости (точности) процесса относительно поля допуска определяется из выражения³:

$$K_u = \frac{\sigma}{D_n}, \quad (1)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение показателя; D_n – поле допуска показателя.

Коэффициент стабильности процесса характеризует постоянство распределения вероятностей его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне⁴. Для определения коэффициента стабильности технологического процесса K_c используют формулу:

$$K_c = \frac{K_p(t_2)}{K_p(t_1)},$$

где $K_p(t_2)$ – показатель рассеяния за период времени t_2 ; $K_p(t_1)$ – показатель рассеяния за период времени t_1 .

Изучению процессов технологической устойчивости и устойчивого функционирования машинотракторных агрегатов (МТА) посвящены работы отечественных ученых [9; 10]. Предложена оценка энергетических свойств трактора при криволинейном движении по затрате работы на единицу пути – по величине удельных энергетических затрат E_{ud} , определяемых по формуле [10]:

$$E_{ud} = \frac{M \cdot \varphi}{S},$$

где M – ведущий момент двигателя, Н м; φ – угол поворота двигателя в окружном направлении на пройденном пути S (м), рад.

Выявлено, что наиболее эффективными критериями для оценки управляемости и устойчивости МТА являются следующие: удельные энергетические затраты на совершение поворота E_{ud} и максимальные ширина X_{max} и высота Y_{max} поворотной полосы [10].

Повышение устойчивости технологических процессов является актуальной задачей и в сфере возделывания сельскохозяйственных культур. В настоящее время накоплен богатый фактический материал, свидетельствующий о том, что уровень видового разнообразия микробного сообщества почвы можно рассматривать в качестве одного из наиболее важных критериев устойчивости основных экологических функций почвы. В качестве эталона устойчивой почвенной системы взята целинная дерново-подзолистая почва под лесом, отличающаяся

³ Евтушкова Е.П., Брянцева Д.И. Оценка экологической устойчивости земель сельскохозяйственного назначения Сорокинского района Тюменской области. С. 18–25. <https://elibrary.ru/becshg>

⁴ ОКСТУ 0016 Р 50-601-20-91. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования). М.: Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации (ВНИИС) Госстандарта России; 1991. 31 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293795/4293795181.pdf> (дата обращения: 21.02.2025).

максимальными показателями гумусированности и хорошо выраженной зернисто-комковатой структурой [11].

Алтайскими учеными изложены результаты исследований по оценке землепользования в аграрном секторе Алтайского края как основы повышения его устойчивости. Дана оценка природно-ресурсному потенциалу и экологическому состоянию территории. Выявлено, что особенности ландшафтов и ресурсный потенциал исследуемой территории неустойчивы, а аграрное землепользование должно базироваться на системе почвозащитных мероприятий, направленных на уменьшение эрозионных процессов (дефляция), почти повсеместно проявляющихся на сельскохозяйственных угодьях [12].

Оценка развития аграрного производства за последние 15 лет в Белгородской области показала положительные сдвиги и повышение его устойчивости. Устойчивое развитие региона предполагает комплексный подход в использовании всех ресурсов и повышение устойчивости развития каждого предприятия в отдельности. Устойчивость должна оцениваться не итогами отдельных лет, а динамикой развития за длительный отрезок времени, процессами воспроизводства ресурсов и финансовыми результатами [13].

В качестве системы показателей оценки устойчивости сельских территорий предлагается рассматривать⁵:

- показатели экономической стабильности развития сельских территорий (наличие ресурсов, уровень развития производственной инфраструктуры, состояние сельскохозяйственных рынков, финансово-инвестиционная устойчивость и др.);
- социальные показатели сельского развития, отражающие состояние демографии, доходов, образования, здравоохранения, культуры, безопасности в границах сельских территорий;
- показатели оценки экологического статуса сельской местности, касающиеся состояния атмосферы, земельных и водных ресурсов, биоразнообразия и др.;
- показатели уровня благоприятности институциональной среды (институциональная устойчивость, безопасность, привлекательность и др.).

Л. В. Кирейчевой представлено обоснование мелиорации как приема повышения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственного производства. Для этого выполнена оценка энергетического состояния агроэкосистемы и возможного продукционного потенциала при проведении мелиораций. В качестве основных критериальных параметров, определяющих энергетическое состояние системы, предложены: радиационный баланс, гидротермический режим почвы, агрохимические показатели, содержание и состав почвенного гумуса [14].

Оценке устойчивости агроэкосистемы на примере различных регионов страны посвящены работы отечественных ученых⁶ [15]. Так, в качестве основного

⁵ Головина С.Г. Оценка устойчивости развития сельских территорий. В: Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет; 2018. Т. 1. С. 100–101. <https://elibrary.ru/yubufh>

⁶ Семенова Т.В., Червяков А.В., Кабартай С.Х. Устойчивость агроэкосистемы нижней Кубани. В: Современный взгляд на будущее науки: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Казань: Аэтерна; 2017. Ч. 3. С. 35–37. <https://elibrary.ru/yhbchd>

интегрального показателя оценки устойчивости сельских территорий предлагается использовать эффективность применения питательных веществ на разных уровнях организации пространства [16]. Учеными установлено, что при увеличении в агросерой почве органического вещества улучшается экологическая функция: больше адсорбируется цинка и меди, что следует рассматривать как важный фактор устойчивости почвы и агроэкосистемы к загрязнению [17].

Большое количество исследований посвящены вопросу обеспечения финансовой устойчивости предприятий [18], инвестиционных процессов [19], обоснованию микробиологических критериев экологической устойчивости почв⁷, критериев оценки устойчивости и эффективности региональных агропродовольственных систем и др. С помощью нечетко-возможностного метода была синтезирована нечетко-возможностная модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов в количественном выражении, позволяющая сравнить состояние предприятий в исследуемый момент времени. Полученная модель может использоваться для поддержки принятия решений планирования, прогнозирования и выбора сценариев модернизации конкретных сельхозпредприятий [20].

Современное интенсивное сельское хозяйство представляет серьезную опасность для природы, поскольку приводит к утрате биоразнообразия, чрезвычайно высокому потреблению воды, способствует изменению климата из-за выбросов парниковых газов, значительно нарушает круговорот азота и фосфатов (N, P), ведет к нерациональному использованию азотных и фосфорных удобрений и ускоряет процессы эвтрофикации [21; 22]. Безопасность производимой продукции также ставится под угрозу.

Имеющиеся стандарты и методики по оценке устойчивости агросистем определяют приоритет экологических, социальных и экономических показателей. При этом существует значительный дисбаланс между экологической, социальной и экономической устойчивостью, но в большинстве оценок преобладающим показателем выступает экологическая устойчивость [23].

Как правило, устойчивость сельскохозяйственных систем оценивается с помощью индикаторов, которые являются аналитическими переменными, описывающими сложные системы. Каждый индикатор касается одного аспекта устойчивости (например, питательных веществ, пестицидов, энергии и др.), поэтому результат полной оценки обычно включает несколько значений индикатора. Эти значения часто рассчитываются отдельно, в то время как комплексная оценка более эффективна, так как позволяет получить результаты расчета сразу по ряду ключевых показателей устойчивости. Такой подход способствует прозрачной, надежной и количественной оценке устойчивости сельскохозяйственных систем. При необходимости его можно легко расширить, добавив другие показатели, и настроить, изменив пороговые значения и весовые коэффициенты показателей оценки [24].

⁷ Дегтярева И.А., Яппаров А.Х. Микробиологические критерии экологической устойчивости почв. В: Состояние и динамика плодородия почв в связи с продуктивностью земледелия: материалы IX Междунар. симпозиума НП «Содружество ученых агрохимиков и агроэкологов». Казань: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова; 2017. С. 95–102. <https://elibrary.ru/yptmjy>

В разных системах оценки устойчивости предлагается большое количество показателей, что вызывает сомнения в обоснованности подходов и их полезности. Выбор показателей требует прозрачных и четко сформулированных процедур, обеспечивающих актуальность и обоснованность оценок устойчивости. Чтобы повысить прозрачность, актуальность и надежность оценок устойчивости, необходимо учитывать контекст оценки устойчивости, в том числе приоритетность критериев отбора показателей. Процесс разработки показателей и систем устойчивого развития может быть гораздо более важным фактором, определяющим их успех, чем окончательная форма инструментов оценки [25].

В основном исследователи склоняются к проведению комплексной оценки устойчивости и рассматривают совокупность критериев устойчивого развития, принимая во внимание прежде всего экологический (оценка качества почвы, эффективность использования энергии, управление отходами и их утилизация, видовое разнообразие), экономический (извлечение прибыли, стабильность производства) и социальный (качество жизни, развитие потенциала, условия занятости) показатели [26; 27].

В каждом отдельном случае следует исходить из неизбежности нахождения компромиссов между различными аспектами устойчивого развития, например, при оценке продовольственной системы [28] или агросистемы в целом. Решение таких задач проводится поэтапно: 1) анализ критериев, соответствующих индикаторам оценки, 2) обоснование эффективности оценки устойчивости для каждой категории показателей, 3) сравнение весомости той или иной категории показателей [29].

Социальная устойчивость при оценке агроэкосистемы или отдельно взятого сельскохозяйственного предприятия имеет немаловажное значение, поскольку наряду с экологическими и экономическими требованиями способствует обеспечению высокого уровня и качества жизни сельского населения [30].

Так, в ходе исследования с участием более 3 600 потребителей из шести стран (Бразилии, Китая, Индии, Мексики, Испании, США) производства продуктов питания на основе принципов устойчивости в сельском хозяйстве выяснилось, что большинство покупателей не до конца осознают важность устойчивого развития. Потребители склонны ассоциировать устойчивое сельскохозяйственное производство только с органическим сельским хозяйством и более высоким качеством продукции [31].

Для решения проблем устойчивости сельскохозяйственного производства в мире необходимы новые подходы в виде инициативных проектов, которые на основании определения показателей оценки как инструмента сертификации способствовали бы реализации концепции экологической устойчивости в растениеводстве. Примером такого решения может служить проект AGRiS, реализованный как пилотный в Неаполе (Италия) и включающий в себя методы устойчивого производства сельскохозяйственных культур, способствующие сохранению биоразнообразия (севооборот и смешанные посевы, внесение компоста в качестве удобрения, использование перерабатываемых субстратов, биологических средств защиты с вредителями) [32].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В связи с актуальностью проблемы повышения эффективности производства сельскохозяйственной продукции интенсивно развиваются новые методы, связанные с обеспечением устойчивости и стабильности агроэкосистемы и экологической безопасности технологий и технических средств в растениеводстве.

Объекты исследования

Агроэкосистема, ее компоненты, технологии производства сельскохозяйственной продукции, опубликованные результаты исследований по оценке устойчивости агроэкосистемы стали объектами настоящего исследования.

Агроэкосистема состоит из экономического, экологического, энергетического и социального компонентов. Устойчивость и стабильность агроэкосистемы зависит от соблюдения требований, отвечающим данным компонентам. Наиболее значимые параметры и показатели всех составляющих агроэкосистемы должны быть оптимизированы. Сбалансированный комплекс экономических, экологических, энергетических и социальных показателей оценки уточняет состояние агроэкологической системы и с помощью определенных индикаторов регулирует и обеспечивает ее устойчивость и стабильность.

В настоящем исследовании подробно рассмотрены вопросы оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве, тесно связанные с одним из компонентов агроэкосистемы – обеспечением экологической устойчивости.

Методы

Методика исследования опирается на анализ и обобщение опубликованных работ. Авторами был использован метод статистического моделирования процессов, который позволяет выявить их закономерность, определить и обоснованно выбрать весомые факторы, влияющие на устойчивость и стабильность технологических процессов.

Анализ литературы показал, что не существует общей универсальной методики комплексной оценки устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве, обладающей достаточной четкостью и наглядностью. В этой связи авторы в рамках настоящей работы решили восполнить этот пробел.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с множеством показателей оценки экологической безопасности технологических процессов и технических средств в растениеводстве при оценке их устойчивости целесообразно использовать интегральный критерий, учитывающий единичные показатели с учетом их весомых значений. Только при таком подходе возможна объективная оценка экологической устойчивости технологических процессов, технологий производства сельскохозяйственной продукции и агроэкосистемы в целом.

Основная цель оценки устойчивости технологических процессов – обоснование критериев устойчивости и определение критических значений экологических показателей, в пределах которых обеспечивается эколого-экономическая эффективность и качество конечной производимой продукции в агроэкосистеме.

Интегральный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов должен формировать запас устойчивости, в пределах которого технические средства будут функционировать надежно, не выходя из устойчивого режима.

Интегральный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов Q_i в общем случае можно выразить формулой:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n K_i Z_i, \quad (2)$$

где K_i – частный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов; Z_i – коэффициент весомости частного критерия оценки экологической устойчивости технологических процессов, который отражает относительную значимость или важность конкретного фактора или показателя по сравнению с другими; n – число частных критериев оценки технологических процессов.

Формула (2) позволяет определить интегральный критерий оценки экологической устойчивости с учетом различных критических показателей, оказывающих деградиционное воздействие технологических процессов на агроэкосистему.

Группа частных экологических критериев (показателей) описывает ограничения, накладываемые на технологический процесс. Применительно к комплексу технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву нами ранее были обоснованы и выбраны наиболее весомые показатели:

- давление движителей на почву (D_d , МПа);
- буксование движителей энергетического средства (B_d , %);
- доза внесения жидких органических удобрений (D_u , т/га);
- неравномерность внесения жидких органических удобрений (K_u , %);
- выбросы вредных веществ двигателями при сжигании топлива (B_b , г/га);
- выбросы аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений (B_{NH_3} , мг/м³).

С учетом данных показателей и выражения (2), применительно к оценке экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений, интегральный критерий оценки их экологической устойчивости можно записать в виде:

$$K_u^{ou} = (K_u^{D_d} \cdot Z_i^{D_d}) + (K_u^{B_d} \cdot Z_i^{B_d}) + (K_u^{D_u} \cdot Z_i^{D_u}) + \\ + (K_u^{K_u} \cdot Z_i^{K_u}) + (K_u^{B_b} \cdot Z_i^{B_b}) + (K_u^{B_{NH_3}} \cdot Z_i^{B_{NH_3}}), \quad (3)$$

где $K_u^{D_d}$ – частный критерий оценки устойчивости давления движителей на почву; $K_u^{B_d}$ – частный критерий оценки устойчивости буксования энергетического средства; $K_u^{D_u}$ – частный критерий оценки устойчивости дозы внесения жидких органических удобрений; $K_u^{K_u}$ – частный критерий оценки устойчивости неравномерности внесения жидких органических удобрений; $K_u^{B_b}$ – частный критерий оценки устойчивости выбросов вредных веществ двигателями при сжигании топлива; $K_u^{B_{NH_3}}$ – частный критерий оценки устойчивости выбросов аммиака с поверхности

поля после внесения жидких органических удобрений; $Z_i^{D_d}$ – коэффициент весо-
мости давления движителей на почву; $Z_i^{B_d}$ – коэффициент весо-
мости буксования движителей энергетического средства; $Z_i^{D_u}$ – коэффициент весо-
мости дозы внесения жидких органических удобрений; $Z_i^{K_u}$ – коэффициент весо-
мости неравномерности внесения жидких органических удобрений; $Z_i^{B_b}$ – коэффициент весо-
мости выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива; $Z_i^{B_{NH_3}}$ – коэффи-
циент весо-мости выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких
органических удобрений.

Весомость показателей экологической оценки была определена от степени их
влияния на плодородие почвы, диффузную нагрузку и выброс парниковых газов.

Частный критерий оценки устойчивости давления движителей на почву $K_u^{D_d}$
можно определить из выражения:

$$K_u^{D_d} = \left| \frac{D_d^* - D_d^f}{D_d^*} \right|, \quad (4)$$

где D_d^* – допустимое значение давления движителей на почву, МПа; D_d^f – фак-
тическое среднее значение давления движителей на почву, МПа.

Частный критерий оценки устойчивости буксования энергетического сред-
ства $K_u^{B_d}$ можно вычислить из зависимости:

$$K_u^{B_d} = \left| \frac{B_d^* - B_d^f}{B_d^*} \right|, \quad (5)$$

где B_d^* – допустимое (оптимальное) значение буксования движителей энергетиче-
ского средства, %; B_d^f – фактическое среднее значение буксования движителей
энергетического средства, %.

Частный критерий оценки устойчивости дозы внесения жидких органических
удобрений $K_u^{D_u}$ определяется из равенства:

$$K_u^{D_u} = \left| \frac{D_u^* - D_u^f}{D_u^*} \right|, \quad (6)$$

где D_u^* – оптимальная доза внесения жидких органических удобрений, т/га;
 D_u^f – фактическое среднее значение дозы внесения жидких органических удоб-
рений, т/га.

Частный критерий оценки устойчивости неравномерности внесения жидких
органических удобрений $K_u^{K_u}$ определяется из выражения:

$$K_u^{K_u} = \left| \frac{K_u^* - K_u^f}{K_u^*} \right|, \quad (7)$$

где K_u^* – оптимальное (допустимое) значение коэффициента неравномерности
внесения жидких органических удобрений, %; K_u^f – фактическое среднее значе-
ние коэффициента неравномерности внесения жидких органических удобрений.

Частный критерий оценки устойчивости выбросов вредных веществ двигателями при сжигании топлива $K_u^{B_b}$ можно определить так:

$$K_u^{B_b} = \left| \frac{B_b^* - B_b^f}{B_b^*} \right|, \quad (8)$$

где B_b^* – допустимое значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива, г/га; B_b^f – фактическое среднее значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива, г/га.

Частный критерий оценки устойчивости выброса аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений $K_u^{B_{NH_3}}$ вычисляется из выражения:

$$K_u^{B_{NH_3}} = \left| \frac{B_{NH_3}^* - B_{NH_3}^f}{B_{NH_3}^*} \right|, \quad (9)$$

где $B_{NH_3}^*$ – допустимое значение выброса аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений, мг/м³; $B_{NH_3}^f$ – фактическое среднее значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений, мг/м³.

Коэффициент весомости $Z_i^{D_d}$, $Z_i^{D_d}$, $Z_i^{D_d}$, $Z_i^{K_u}$, $Z_i^{B_b}$ и $Z_i^{B_{NH_3}}$ показателей оценки экологической безопасности технологических процессов можно определить расчетно-эмпирическим методом. Достоинство расчетно-эмпирического метода состоит в объективности, сопоставимости и воспроизводимости полученных результатов оценки.

Коэффициент весомости показателей оценки экологической безопасности технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву Z_i при использовании расчетно-эмпирического метода определяется по формуле:

$$Z_i = \frac{\Delta x_i}{\sum_1^n \Delta x_i^n},$$

где Δx_i – среднее значение отклонения конкретного показателя от оптимального или допускаемого диапазона, %; $\sum_1^n \Delta x_i^n$ – сумма отклонений всех показателей оценки, %.

Среднее значение отклонения конкретного показателя от оптимального (допускаемого диапазона) Δx_i можно вычислить из выражения:

$$\Delta x_i = \left| \frac{x_i^f - x_i^*}{x_i^*} \right| \cdot 100\%,$$

где x_i^f – фактическое значение показателя оценки экологической безопасности, установленное экспериментально; x_i^* – оптимальное (допускаемое) значение показателя оценки экологической безопасности.

В формулах (4)–(9) допустимый диапазон изменения значения (табл. 1) показателей оценки экологической безопасности технологических процессов

$D_d^*, B_d^*, D_u^*, K_u^*, B_b^*$ и $B_{NH_3}^*$ регламентируются соответствующими нормативными документами.

Таблица 1

Table 1

Допустимые значения показателей оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву

Acceptable values of indicators for assessing the environmental sustainability of technological processes for transporting and applying liquid organic fertilizers to the soil

№	Наименование показателей / Name of indicators	Обозначение / Designation	Допустимое значение / Acceptable value
1	2	3	4
1	Давление движителей на почву / Pressure of propellers on the ground	D_d , МПа / MPa	Не более 80–110 МПа (или 0,8–1,1 кг/см ²) ⁸ / No more than 80–110 MPa (or 0.8–1.1 kg/cm ²)
2	Буксование движителей энергетического средства / Slippage of the propulsion units of the power vehicle	B_d , %	Движителей гусеничных и колесных тракторов с двумя и четырьмя ведущими колесами ⁹ должно быть не более 3, 14 и 16 % соответственно / The number of crawler and wheeled tractors with two and four driving wheels ¹ should not exceed 3, 14 and 16%, respectively.
3	Доза внесения жидких органических удобрений / Application rate of liquid organic fertilizers	D_u , т/га / t/ha	Устанавливается агрохимической службой ¹⁰ / It is established by the agrochemical service
4	Неравномерность внесения жидких органических удобрений / Uneven application of liquid organic fertilizers	K_u , %	Неравномерность высева удобрений ¹¹ или их смесей не должна превышать ±15 %, а для разбрасывателей ±25 % (по ширине внесения) и ±10 % по ходу движения машинотракторного агрегата. Отклонение от средней фактической дозы внесения удобрений не должно выходить за пределы ±10 % / Unevenness in the seeding of fertilizers or their mixtures should not exceed ±15%, and for spreaders ±25% (along the application width) and ±10% along the direction of travel of the machine-tractor unit. Deviation from the average actual dose of fertilizer application should not exceed ±10%.
5	Выбросы вредных веществ двигателями при сжигании топлива / Emissions of harmful substances from engines when burning fuel	B_b , г/га / g/ha	≤ 57 г при сгорании 1 кг дизельного топлива ¹² / ≤ 57 g when burning 1 kg of diesel fuel

⁸ ГОСТ Р 58655-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169432> (дата обращения: 21.02.2025).

⁹ Гапич Д.С., Токарев В.И., Панчишкин А.П. Технологическая адаптация тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов: моногр. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН; 2024. 156 с.

¹⁰ Шеуджен А.Х., Громова Л.И., Онищенко Л.М. Методы расчета доз удобрений: учеб. пособие. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2010. 61 с.

¹¹ Саакян Д.Н. Контроль качества механизированных работ в полеводстве. М.: Колос; 1973. 264 с.; Дворниченко С.В., Бабаченко С.В., Коробской С.А., Пономаренко Н.В. Обеспечение равномерности высева минеральных удобрений путем совершенствования конструкции высевающего аппарата. *Активная честолобная интеллектуальная молодежь сельскому хозяйству*. 2019;(1):45–48. <https://elibrary.ru/htiiky>

¹² 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: 21.02.2025); Альферович В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. Анализ состава отработавших газов. Минск: БНТУ; 2016. Ч. 1. 54 с.

Окончание табл. 1 / End table 1

1	2	3	4
6	Выбросы аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений / Ammonia emissions from the field surface after application of liquid organic fertilizers	B_{NH_3} , мг/м ³ / mg/m ³	При длительном нахождении аммиака в воздухе концентрация для сельскохозяйственных культур не должна превышать 75 мкг/м ³ (или 0,075 мг/м ³), а при продолжительности воздействия не более суток – 350 мкг/м ³ (или 0,350 мг/м ³) [33] / If ammonia is present in the air for a long time, the concentration for agricultural crops should not exceed 75 µg/m ³ (or 0.075 mg/m ³), and if the duration of exposure is no more than 24 hours – 350 µg/m ³ (or 0.350 mg/m ³) [33]

С использованием выражений (3)–(9) и таблицы 1 были определены значения частных и интегрального критериев оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета коэффициента весомости показателей и интегрального критерия оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву расчетно-эмпирическим методом
Results of calculating the weighting coefficient of indicators and the integral criterion for assessing the environmental sustainability of technological processes for transporting and applying liquid organic fertilizers to the soil using the calculation-empirical method

Значение показателя / Value of the indicator	D_d , МПа (кг/см ²) / МПа (kg/cm ²)	B_d , %	D_u , т/га / t/ha	K_u , %	B_b , г/га / g/ha	B_{NH_3} , мкг/м ³ / µg/m ³
Оптимальное значение или допустимый диапазон изменения / Optimal value or acceptable range of variation	100	14	2	±25	57·6 = 342 г / g	≤ 350
Фактическое значение / Actual value	110	16	2	±26	400	400
Δx_i	10	2	0	1	58	50
Δx_p , %	10	14,2900	0	4	16,960	14,2800
$\sum_1^n \Delta x_i^n$, %				59,5300		
Z_i	0,1680	0,2400	0	0,0670	0,2850	0,2400
$\sum Z_i$				1		
Значения частных критериев / Values of private criteria						
Значения K_i / Values K_i	0,1000	0,1430	0	0,0400	0,1700	0,1430
K_{iZ_i}	0,0168	0,0343	0	0,0026	0,0484	0,0343
Значение (интегрального) обобщенного критерия оценки устойчивости технологических процессов / The value of the (integral) generalized criterion for assessing the stability of technological processes				$K_u^{ou} = 0,136$		

Интегральный критерий оценки устойчивости зависит от того, насколько велика доля показателей экологической оценки, для которых показатели качества технологического процесса находятся в поле допуска.

Интегральный критерий оценки устойчивости характеризует уровень настройки технологического процесса. Интегральный критерий устойчивости характеризует различие между фактическим и оптимальным уровнем настройки процесса. Чем ближе интегральный критерий устойчивости к нулю, тем ближе уровень настройки технологического процесса к оптимальному.

Интегральный критерий оценки устойчивости позволяет оценить стабильность технологического процесса. При $K_u^{ou} = 0$ технологический процесс считается экологически устойчивым, так как все показатели оценки его экологической безопасности находятся в пределах допустимых значений.

Из-за вероятностного характера внешних возмущающих воздействий, таких как рельеф местности, профиль поверхности поля, влажность, твердость почвы, глубина обработки почвы и др., показатели оценки технологических процессов не остаются постоянными и колеблются в широких пределах. Из этого следует, что на практике технологические процессы не могут быть все время устойчивыми на 100 %, т. е. $K_u^{ou} \neq 0$.

Установленный K_u^{ou} должен быть достаточным для обеспечения нормального протекания технологических процессов, без ухудшения показателей оценки их экономической, технологической, энергетической и экологической эффективности.

Анализ литературы показал, что при ранжировании авторы используют одну из характеристик рассеяния оценочных показателей оценки процессов, входящих в критерий K_u^{ou} . При случайном характере изменения параметров и показателей наиболее наглядной характеристикой их рассеяния является коэффициент их вариации v_x , которая определяется отношением среднего квадратического отклонения σ_x параметра (или показателя) к его среднему значению \bar{x} [7].

В зависимости от характера изменения параметров и показателей их отклонение от заданного значения может быть односторонним или двухсторонним. Исследуемым нами показателям (табл. 2) характерно одностороннее изменение. Так как рассматриваемые показатели вероятностные, дифференциация интегрального критерия оценки устойчивости K_u^{ou} должна производиться по мере его рассеяния.

Дифференциация позволяет разработать шкалу оценки и ранжировать технологические процессы по степени их экологической устойчивости. В математической статистике принято считать, что если мера рассеяния показателя (или параметра) $< 0,1$ (или 10 %), то его разброс считается незначительным. Если мера рассеяния показателя изменяется от 0,1 до 0,2, то его разброс относительно заданного значения считается средним. При мере рассеяния показателя от 0,2 до 0,3 степень рассеяния считается значительной.

С учетом сказанного и формул (3)–(10) диапазоны изменения интегрального критерия, в том числе и частных критериев, можно дифференцировать следующим образом (табл. 3).

**Шкала оценки технологических процессов по значениям интегрального критерия
оценки K_u^{ou} их экологической устойчивости**

**Scale for assessing technological processes based on the values K_u^{ou} of the integral criterion
for assessing their environmental sustainability**

Класс экологической устойчивости / Environmental sustainability class	Значения критерия K_u^{ou} / Criterion value K_u^{ou}	Степень экологической устойчивости технологического процесса / The degree of environmental sustainability of the technological process
I	0–0,111	Устойчивый / Stable
II	0,112–0,222	Среднеустойчивый / Medium-resistant
III	0,223–0,333	Неустойчивый / Unstable
IV	> 0,333	Высокая энтропия / High entropy

Результаты расчетов частных и интегральных критериев оценки, полученные расчетно-эмпирическим методом (табл. 2), показывают, что технологические процессы транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву являются экологически среднеустойчивыми, так как $K_u^{ou} = 0,136$.

При изменении значения критерия K_u^{ou} в пределах от 0,222 до 0,333 технологический процесс является неустойчивым, так как при этом наблюдается значительное отклонение показателей оценки от допустимых их значений.

При $K_u^{ou} \geq 0,333$ наблюдается высокая энтропия, что является закономерным результатом отсутствия согласованности в выполнении технологических процессов, порядка и точности их выполнения. Это в конечном итоге приводит к разрушению технологии.

Стабильность технологического процесса – это свойство сохранять во времени постоянною характеристику распределения показателей экологической оценки.

В соответствии с ОКСТУ 0016 Р 50-601-20-91 и ГОСТ Р 50779.44-2001¹³ результатом оценки стабильности должно быть одно из следующих состояний процесса:

- стабилен и по разбросу и по положению среднего арифметического;
- стабилен по разбросу, но нестабилен по положению среднего арифметического;
- нестабилен по разбросу.

Стабильность технологического процесса предлагаем оценить по критерию δ_{st}^{TP} , который определяется по значениям степени неравномерности экологических показателей оценки процесса в зависимости от времени их измерения, по формуле:

¹³ ОКСТУ 0016 Р 50-601-20-91. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования).

$$\delta_{st}^{TP} = \frac{\delta_{D_d}(t_2) + \delta_{B_d}(t_2) + \delta_{D_u}(t_2) + \delta_{K_u}(t_2) + \delta_{B_b}(t_2) + \delta_{B_{NH_3}}(t_2)}{\delta_{D_d}(t_1) + \delta_{B_d}(t_1) + \delta_{D_u}(t_1) + \delta_{K_u}(t_1) + \delta_{B_b}(t_1) + \delta_{B_{NH_3}}(t_1)}, \quad (10)$$

где $\delta_{D_d}(t_1) = \frac{D_d^{\max}(t_1) - D_d^{\min}(t_1)}{D_d^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности давления движителей трактора на почву за период времени t_1 ; $\delta_{B_d}(t_1) = \frac{B_d^{\max}(t_1) - B_d^{\min}(t_1)}{B_d^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $\delta_{D_u}(t_1) = \frac{D_u^{\max}(t_1) - D_u^{\min}(t_1)}{D_u^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $\delta_{K_u}(t_1) = \frac{K_u^{\max}(t_1) - K_u^{\min}(t_1)}{K_u^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $\delta_{B_b}(t_1) = \frac{B_b^{\max}(t_1) - B_b^{\min}(t_1)}{B_b^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $\delta_{B_{NH_3}}(t_1) = \frac{B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_1) - B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_1)}{B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $\delta_{D_d}(t_2) = \frac{D_d^{\max}(t_2) - D_d^{\min}(t_2)}{D_d^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности давления движителей трактора на почву за период времени t_2 ; $\delta_{B_d}(t_2) = \frac{B_d^{\max}(t_2) - B_d^{\min}(t_2)}{B_d^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности буксования движителей трактора за период времени t_2 ; $\delta_{D_u}(t_2) = \frac{D_u^{\max}(t_2) - D_u^{\min}(t_2)}{D_u^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_2 ; $\delta_{K_u}(t_2) = \frac{K_u^{\max}(t_2) - K_u^{\min}(t_2)}{K_u^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_2 ; $\delta_{B_b}(t_2) = \frac{B_b^{\max}(t_2) - B_b^{\min}(t_2)}{B_b^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_2 ; $\delta_{B_{NH_3}}(t_2) = \frac{B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_2) - B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_2)}{B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_2 ; $D_d^{\max}(t_1)$ – максимальное значение давления движителей на почву за период времени t_1 ; $D_d^{\min}(t_1)$ – минимальное значение давления движителей на почвы за период времени t_1 ; $D_d^{sp}(t_1)$ – среднее значение давления движителей

на почвы за период времени t_1 ; $B_d^{\max}(t_1)$ – максимальное значение буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $B_d^{\min}(t_1)$ – минимальное значение буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $B_d^{sp}(t_1)$ – среднее значение буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $D_u^{\max}(t_1)$ – максимальное значение дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $D_u^{\min}(t_1)$ – минимальное значение дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $D_u^{sp}(t_1)$ – среднее значение дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $K_u^{\max}(t_1)$ – максимальное значение степени неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $K_u^{\min}(t_1)$ – минимальное значение степени неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $K_u^{sp}(t_1)$ – среднее значение степени неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $B_b^{\max}(t_1)$ – максимальное значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $B_b^{\min}(t_1)$ – минимальное значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $B_b^{sp}(t_1)$ – среднее значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_1)$ – максимальное значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_1)$ – минимальное значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_1)$ – среднее значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $D_d^{\max}(t_2)$, $B_d^{\max}(t_2)$, $D_u^{\max}(t_2)$, $K_u^{\max}(t_2)$, $B_b^{\max}(t_2)$, $B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_2)$ – соответственно максимальные значения исследуемых показателей за период времени t_2 ; $D_d^{\min}(t_2)$, $B_d^{\min}(t_2)$, $D_u^{\min}(t_2)$, $K_u^{\min}(t_2)$, $B_b^{\min}(t_2)$, $B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_2)$ – соответственно минимальные значения исследуемых показателей за период времени t_2 ; $D_d^{sp}(t_2)$, $B_d^{sp}(t_2)$, $D_u^{sp}(t_2)$, $K_u^{sp}(t_2)$, $B_b^{sp}(t_2)$, $B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_2)$ – соответственно средние значения исследуемых показателей за период времени t_2 .

Результаты расчета критерия $Z_i^{D_d}$ и оценки стабильности технологического процесса внесения жидких органических удобрений в почву приведены в таблице 4.

Таблица 4
Table 4

Результаты расчета критерия Z_{i_d} и оценки стабильности технологического процесса
внесения жидких органических удобрений в почву
Results of calculation of the criterion Z_{i_d} and assessment of the stability of the technological
process of introducing liquid organic fertilizers into the soil

Значение показателя / Value of the indicator	D_d , МПа (кг/см ²) / МПа (kg/cm ²)	B_d , %	D_u , т/га / t/ha	K_u , %	B_b , г/га / g/ha	$\Delta x_i = \left \frac{x_i^f - x_i^*}{x_i^*} \right \cdot 100\%$, мкг/м ³ / µg/m ³
Оптимальный или допустимый диапазон изменения / Optimal or acceptable range of variation	100	14	2	±25	57·6 = 342 г	≤ 350
Фактическое среднее / Actual average						
Максимальное за период времени t_1 / Maximum for time period t_1	110	16	2	±25	400	400
Минимальное за период времени t_1 / Minimum for time period t_1	125	18	2,120	±26	450	450
Максимальное за период времени t_2 / Maximum for time period t_2	95	14	1,880	±24	350	350
Минимальное за период времени t_2 / Minimum for time period t_2	0,273	0,250	0,120	0,080	0,250	0,250
$\delta_i(t_1)$				1,223		
$\sum \delta_i(t_1)$						
Максимальное за период времени t_2 / Maximum for the period of time t_2	115	16	2,120	±26	420	450
Минимальное за период времени t_2 / Minimum for the period of time t_2	95	14	1,880	±24	340	350
$\delta_i(t_2)$	0,181	0,125	0,120	0,080	0,200	0,250
$\sum \delta_i(t_2)$				0,956		
δ_{st}^{TP}				0,782		

Результаты расчетов частных и интегральных критериев оценки, полученные расчетно-эмпирическим методом (табл. 2), показывают, что технологические процессы транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву являются экологически среднеустойчивыми, так как $K_u^{ou} = 0,136$.

При изменении значения критерия K_u^{ou} в пределах от 0,222 до 0,333 технологический процесс является неустойчивым, так как при этом наблюдается значительное отклонение показателей оценки от допустимых их значений.

При $K_u^{ou} \geq 0,333$ наблюдается высокая энтропия, т. е. отсутствие согласованности в выполнении технологических процессов, порядка и точности их выполнения, что в конечном итоге приводит к разрушению технологии.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в своем большинстве существующие антропогенные воздействия в растениеводстве несут в себе отрицательное влияние на окружающую среду, при этом имеют целенаправленный характер, т. е. осуществляются сознательно для повышения эффективности отрасли. В частности, это приводит к снижению устойчивости и стабильности технологических процессов агротехнологий и агроэкосистемы при производстве сельскохозяйственной продукции.

В настоящее время практически невозможно произвести оценку процессов по уровню их неблагоприятного влияния на среду на основе существующих методов, не учитывающих номенклатуру обоснованных показателей, зональные требования и условия возделывания культур. В этом случае появляется необходимость применения комплексного подхода, который позволит учесть и рассчитать наиболее весомые показатели устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве на основе предложенных критериев, и в ближайшем будущем использовать их в качестве базиса при разработке алгоритмов и цифровых технологий принятия решений для повышения экологической безопасности агроэкосистемы.

Изложенный в статье подход, порядок расчета и оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов позволяет выработать управленческие решения, направленные на гармоничное эколого-экономико-социальное развитие региона.

Разработан и предложен интегральный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов, который должен формировать запас устойчивости, в пределах которого технологические процессы и соответствующие технические средства будут функционировать надежно, не выходя из устойчивого режима.

Интегральный критерий оценки включает в себя частные критерии, каждый из которых в отдельности позволяет оценить устойчивость определенного экологического показателя оценки процесса.

Применительно к комплексу технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву выбраны наиболее весомые показатели, такие как буксование и давление движителей на почву, доза и неравномерность внесения удобрений, выбросы вредных веществ двигателями при сжигании топлива и аммиака с поверхности поля после внесения удобрений.

Приведены результаты расчета коэффициента весомости показателей и интегрального критерия оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву.

Обоснована шкала оценки технологических процессов по значениям интегрального критерия оценки их экологической устойчивости. Согласно предложенной шкале технологические процессы подразделены на устойчивые, среднеустойчивые, неустойчивые и с высокой энтропией (отсутствие согласованности, порядка и точности выполнения).

Для оценки стабильности технологических процессов разработан обобщенный критерий, который определяется по значениям степени неравномерности изменения показателей экологической оценки процессов в зависимости от времени их измерения.

Предложенный подход для определения интегрального критерия оценки экологической устойчивости (3) и стабильности (10) можно использовать при оценке других технологических процессов. При этом показатели оценки экологической устойчивости и стабильности могут быть другими и должны быть научно обоснованы.

Представленную методику в дальнейшем можно использовать при разработке компьютерной программы для автоматизации расчета и оценки устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мацнева Е.А., Магарил Е.Р. Оценка критериев экологической безопасности для определения уровня устойчивости промышленного предприятия. *Экология и промышленность России*. 2013;(2):54–56. <https://elibrary.ru/punxwv>
2. Адам А.М., Лаптев Н.И., Конорева Ю.Б. Оценка экологической устойчивости развития регионов Сибирского федерального округа. *Теоретические и прикладные аспекты современной науки*. 2015;(8-2):95–97. <https://elibrary.ru/tlqfnp>
3. Коршаков Ф.Н., Жук П.М. Оценка экологической устойчивости сельских населенных мест: состояние вопроса, методология. *Архитектура и современные информационные технологии*. 2021;(3):247–262. <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2021-3-247-262>
4. Шувалова О.А. Оценка экологической устойчивости окружающей среды Волгоградской области. *Проблемы региональной экологии*. 2012(4):31–36. <https://elibrary.ru/pilyht>
5. Юртаев А.А. Агроландшафтные исследования: теория и практика. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011;(15):217–221. <https://elibrary.ru/orqrap>
6. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Обломкова Н.С. Методика оценки экологической устойчивости сельских территорий. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018;(3):164–175. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10070>
7. Чигиринский Ю.Л., Евтюнин А.В., Харламов В.О. Количественная оценка стабильности процессов механической обработки. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021;(1):41–44. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-1-248-41-44>
8. Татаринцев В.Л., Инкаров Д.С., Макенова С.К., Унышева Н.К. Экологическая оценка аграрного землепользования с применением геоинформационная система-технологий. *Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина*. 2023;(2):22–31. <https://elibrary.ru/lrximi>

9. Смелик В.А., Гафаров А.А. Критерии оценки технологической устойчивости сельскохозяйственных агрегатов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2007;(4):33–34. <https://elibrary.ru/hzqbwx>
10. Воронов С.А., Непочатов А.В., Киселев И.А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2011;(1):50–62. <https://elibrary.ru/oiwein>
11. Терещенко Н.Н., Бубина А.Б. Микробиологические критерии экологической устойчивости почвы и эффективности почвозащитных технологий. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2009;(3):42–62. <https://elibrary.ru/laieor>
12. Бунин А.А., Лисовская Ю.С., Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Шостак М.М. Агроэкологическая оценка аграрного землепользования как основа повышения его устойчивости. *Вестник КрасГАУ*. 2021;(4):80–86. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Самодурова М.Ф., Хрючкина Е.А. Оценка устойчивости развития сельскохозяйственного производства в регионе. *Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права*. 2015;(4):112–119. <https://elibrary.ru/vineiz>
14. Кирейчева Л.В. Сельскохозяйственная мелиорация как прием повышения продуктивности и устойчивости агропроизводства. *Агрохимический вестник*. 2022;(5):40–44. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-009>
15. Алферов А.А., Чернова Л.С. Устойчивость агроэкосистемы при применении удобрений и биопрепаратов. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019;(3):35–37. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019335-37>
16. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Козлова Н.П., Обломкова Н.С. Система показателей машинных технологий для достижения экологической устойчивости сельских территорий при производстве животноводческой продукции. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018;(3):156–164. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10069>
17. Головина Н.А., Федорова Е.В., Кодиров А.А. Устойчивость агросерой почвы к загрязнению тяжелыми металлами. *Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева*. 2015;(1):75–79. <https://elibrary.ru/ygchpz>
18. Базарова М.У. Критерии и принципы формирования учетно-аналитической системы обеспечения финансовой устойчивости предприятия. *Актуальные вопросы современной науки*. 2013;(27):245–253. <https://elibrary.ru/rgslxt>
19. Трошин А.С. Критерии развития и устойчивости инвестиционных процессов. *АПК: экономика, управление*. 2011;(1):60–63. <https://elibrary.ru/nbkszr>
20. Васильев Э.В., Спесивцев А.В., Шалавина Е.В., Спесивцев В.А. Математическая модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов на основе экспертных знаний. *АгроЭкоИнженерия*. 2022;(3):82–97. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-82-96>
21. Джаббаров Н.И., Савельев А.П., Добринов А.В., Захаров А.М., Жуйков И.И. Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(1):101–114. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>
22. Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В., Савельев А.П. Моделирование и оценка уровня плодородия почвы. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(3):407–423. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>
23. Konefal J., de Olde E.M., Hatanaka M., Oosterveer P.J.M. Signs of Agricultural Sustainability: A Global Assessment of Sustainability Governance Initiatives and their Indicators in Crop Farming. *Agricultural Systems*. 2023;208:103658. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103658>
24. Castoldi N., Bechini L. Integrated Sustainability Assessment of Cropping Systems with Agro-Ecological and Economic Indicators in Northern Italy. *European Journal of Agronomy*. 2010;32(1):59–72. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.02.003>

25. de Olde E.M., Moller H., Marchand F., McDowell R.W., MacLeod C.J., Sautier M. и др. When Experts Disagree: The Need to Rethink Indicator Selection for Assessing Sustainability of Agriculture. *Environment, Development and Sustainability*. 2017;19:1327–1342. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9803-x>
26. Anam M.S.H., Sulaiman A., Othman A.K., Jamaludin N.F. Review of Sustainability Criteria for Paddy Farming in Malaysia Based on Environmental, Economic and Social Dimensions. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*. 2025;9(1):1344–1362. <https://doi.org/10.47772/IJRISS.2025.9010113>
27. Bachev H. Socio-Economic and Environmental Sustainability of Bulgarian Farms. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2017;3(2):5–21. <https://doi.org/10.51599/are.2017.03.02.01>
28. Béné C., Oosterveer P., Lamotte L., Brouwer I.D., de Haan S., Prager S.D. и др. When Food Systems Meet Sustainability – Current Narratives and Implications for Actions. *World Development*. 2019;113:116–130. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.011>
29. Bonisoli L., Galdeano-Gómez E., Piedra-Muñoz L. Deconstruction: the Qualitative Methodology for the Analysis of Sustainability Assessment Tools of Agri-System. *MethodsX*. 2018;5:635–638. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.06.003>
30. Hale J., Legun K., Campbell H., Carolan M. Social Sustainability Indicators as Performance. *Geoforum*. 2019;103:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.03.008>
31. Sánchez-Bravo P., Chambers V.E., Noguera-Artiaga L., Sendra E., Chambers I.V.E., Carbonell-Barrachina Á.A. Consumer Understanding of Sustainability Concept in Agricultural Products. *Food Quality and Preference*. 2021;89:104136. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104136>
32. Amitrano C., Rossitti M., Waller R., Iovane M., El-Naggar N., Modarelli G.C. и др. AGRiS: Agriculture, Growth and Regeneration Inspired by Sustainability. *Acta Horticulturae*. 2022. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1345.66>
33. Гриднев П.И., Гриднева Т.Т., Шведов А.А. Эмиссия аммиака и ее последствия для окружающей среды. *Вестник ВНИИМЖ*. 2018;(1):42–49. <https://elibrary.ru/ytestj>

REFERENCES

1. Matsneva E.A., Magaril E.R. [Evaluation of Environmental Safety Criteria for Determining the Sustainability Level of an Industrial Enterprise]. *Ecology and Industry of Russia*. 2013;(2):54–56. (In Russ.) <https://elibrary.ru/punxwv>
2. Adam A.M., Laptev N.I., Konoreva Yu.B. [Assessment of Environmental Sustainability of the Development of Regions of the Siberian Federal District]. *Teoreticheskie i Prikladnye Aspekty Sovremennoj Nauki*. 2015;(8-2):95–97. (In Russ.) <https://elibrary.ru/tlqfnp>
3. Korshakov F.N., Zhuk P.M. Rural Settlements Environmental Sustainability Assessment: State of the Problem, Methodology. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2021;(3):247–262. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2021-3-247-262>
4. Shuvalova O.A. [Assessment of the Environmental Sustainability of the Environment of the Volgograd Region]. *Problemy Regionalnoj Ekologii*. 2012(4):31–36. (In Russ.) <https://elibrary.ru/pilyht>
5. Yurtaev A.A. Agrolandscape Research: Theory and Practice. *Nauchnye Vedomosti Belgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye Nauki*. 2011;(15):217–221. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/orqrap>
6. Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V., Oblomkova N.S. Method to Assess Environmental Sustainability of Rural Areas. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produkcii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2018;(3):164–175. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10070>
7. Tchigirinsky Ju.L., Evtynin A.V., Kharlamov V.O. Mechanical Treatment's Stability Quantitative Assessment. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2021;(1):41–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-1-248-41-44>

8. Tatarintsev V.L., Inkarov D.S., Makenova S.K., Unysheva N.K. Environmental Assessment of Agricultural Land use Using Geoinformation System Technologies. *Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University*. 2023;(2):22–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/lrximi>
9. Smelik V.A., Gafarov A.A. [Criteria for Assessing the Technological Sustainability of Agricultural Units]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2007;(4):33–34. (In Russ.) <https://elibrary.ru/hzqbwX>
10. Voronov S.A., Nepochatov A.V., Kiselev I.A. [Criteria for Assessing the Stability of the Milling Process of Flexible Parts]. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2011;(1):50–62. (In Russ.) <https://elibrary.ru/oiewin>
11. Tereshchenko N.N., Bubina A.B. Microbiological Criteria of Soil Ecological Stability and Efficiency of Soil-Protecting Technologies. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2009;(3):42–62. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/laieor>
12. Bunin A.A., Lisovskaya Yu.S., Tatarintsev V.L., Shostak M.M. Agroecological Assessment of Agrarian Land use as a Basis to Increase its Sustainability. *Bulletin of KSAU*. 2021;(4):80–86. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Samodurova M.F., Khryuchkina E.A. [Assessment of the Sustainability of Agricultural Production Development in the Region]. *Vestnik Belgorodskogo Universiteta Kooperatsii, Ekonomiki i Prava*. 2015;(4):112–119. (In Russ.) <https://elibrary.ru/vineiz>
14. Kireycheva L.V. Agricultural Reclaim as a Method of Increasing Productivity and Sustainability of Agricultural Production. *Agrochemical Herald*. 2022;(5):40–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-009>
15. Alferov A.A., Chernova L.S. Sustainability of the Agroecosystem in the Application of Fertilizers and Biopreparations. *Rossiiskaia Selskokhoziaistvennaia Nauka*. 2019;(3):35–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019335-37>
16. Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Kozlova N.P., Oblomkova N.S. System of Indicators of Machine-Based Technologies Contributing to Environmental Sustainability of Rural Areas in Livestock Production. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2018;(3):156–164. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10069>
17. Golovina N.A., Fedorova E.V., Kodirov A.A. Agro-Gray Soil Tolerance to Heavy Metals Pollution. *Vestnik Soveta Molodyh Uchenyh Ryazanskogo Gosudarstvennogo Agrotehnologicheskogo Universiteta Imeni P. A. Kostycheva*. 2015;(1):75–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ygchpz>
18. Bazarova M.U. [Criteria and Principles of Formation of the Accounting and Analytical System of Ensuring the Financial Stability of the Enterprise]. *Aktualnye Voprosy Sovremennoj Nauki*. 2013;(27):245–253. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rgslxt>
19. Troshin A.S. [Criteria for Development and Stability of Investment Processes]. *AIC: Economics, Management*. 2011;(1):60–63. (In Russ.) <https://elibrary.ru/nbksrz>
20. Vasiliev E.V., Spesivtsev A.V., Shalavina E.V., Spesivtsev V.A. Mathematical Model for Environmental Sustainability Assessment of Pig-Breeding Complexes Based on Expert Knowledge. *AgroEcoEngineering*. 2022;(3):82–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-82-96>
21. Jabborov N.I., Savelyev A.P., Dobrinov A.V., Zakharov A.M., Zhuikov I.I. Modeling and Forecasting the Removal of Biogenic Elements from Agricultural Lands Depending on the Soil Agrophysical Properties. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):101–114. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>
22. Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V., Saveliev A.P. Modeling and Assessment of Soil Fertility Level. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):407–423. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>
23. Konefal J., de Olde E.M., Hatanaka M., Oosterveer P.J.M. Signs of Agricultural Sustainability: A Global Assessment of Sustainability Governance Initiatives and their Indicators in Crop Farming. *Agricultural Systems*. 2023;208:103658. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103658>

24. Castoldi N., Bechini L. Integrated Sustainability Assessment of Cropping Systems with Agro-Ecological and Economic Indicators in Northern Italy. *European Journal of Agronomy*. 2010;32(1):59–72. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.02.003>
25. de Olde E.M., Moller H., Marchand F., McDowell R.W., MacLeod C.J., Sautier M., et al. When Experts Disagree: The Need to Rethink Indicator Selection for Assessing Sustainability of Agriculture. *Environment, Development and Sustainability*. 2017;19:1327–1342. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9803-x>
26. Anam M.S.H., Sulaiman A., Othman A.K., Jamaludin N.F. Review of Sustainability Criteria for Paddy Farming in Malaysia Based on Environmental, Economic and Social Dimensions. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*. 2025;9(1):1344–1362. <https://doi.org/10.47772/IJRIS.2025.9010113>
27. Bachev H. Socio-Economic and Environmental Sustainability of Bulgarian Farms. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2017;3(2):5–21. <https://doi.org/10.51599/are.2017.03.02.01>
28. Béné C., Oosterveer P., Lamotte L., Brouwer I.D., de Haan S., Prager S.D., et al. When Food Systems Meet Sustainability – Current Narratives and Implications for Actions. *World Development*. 2019;113:116–130. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.011>
29. Bonisoli L., Galdeano-Gómez E., Piedra-Muñoz L. Deconstruction: the Qualitative Methodology for the Analysis of Sustainability Assessment Tools of Agri-System. *MethodsX*. 2018;5:635–638. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.06.003>
30. Hale J., Legun K., Campbell H., Carolan M. Social Sustainability Indicators as Performance. *Geoforum*. 2019;103:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.03.008>
31. Sánchez-Bravo P., Chambers V.E., Noguera-Artiaga L., Sendra E., Chambers IVE., Carbonell-Barrachina Á.A. Consumer Understanding of Sustainability Concept in Agricultural Products. *Food Quality and Preference*. 2021;89:104136. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104136>
32. Amitrano C., Rossitti M., Waller R., Iovane M., El-Naggar N., Modarelli G.C., et al. AGRiS: Agriculture, Growth and Regeneration Inspired by Sustainability. *Acta Horticulturae*. 2022. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1345.66>
33. Gridnev P.I., Gridneva T.T., Shvedov A.A. The Ammonia Emission and its Consequences for the Environment. *Journal of VNIIMZH*. 2018;(1):42–49. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ytestj>

Об авторах:

Джаббаров Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Добринов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Вклад авторов:

Н. И. Джаббаров – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач, применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования.

А. В. Добринов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

А. П. Савельев – 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 02.08.2025;
принята к публикации 16.08.2025*

About the authors:

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Anatoliy P. Savelyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Authors contribution:

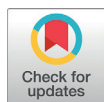
N. I. Dzhabborov – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the study ideas, goals and objectives, applying the statistical, mathematical, computational and other formal methods for the analysis of the study data.

A. V. Dobrinov – conducting experiments and collecting data, preparing the manuscript: writing a manuscript draft, including its translation into the English language.

A. P. Savelyev – conducting the study, preparing the manuscript: visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 30.06.2025; revised 02.08.2025; accepted 16.08.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.750-769>EDN: <https://elibrary.ru/vyewmd>

УДК / UDK 631.315.2:633.854.78

Оригинальная статья / Original article

**Разрушение стерни подсолнечника
лопатками игольчатого диска инновационного
турбодискового культиватора****И. Е. Припоров[✉], В. С. Курасов, В. И. Бацунов***Кубанский государственный аграрный университет
имени И. Т. Трубилина,**г. Краснодар, Российская Федерация*[✉] i.priporov@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Вертикальная обработка почвы является новой ресурсосберегающей технологией, позволяющей повысить урожайность сельскохозяйственных культур до 8,5 ц/га и минимизирующей структуру почвы с повышенной плотностью заделки семян для развития корневой системы. Для проведения вертикальной обработки почвы используют почвообрабатывающие машины, в качестве которых выступают турбодисковые культиваторы. Актуализация требований к экологически безопасным принципам действия на почву технических средств обуславливает поиск оригинальных решений по сохранению ее плодородия и снижению энергозатрат. Большие объемы остатков растительной массы на полях затрудняют обработку почвы, что приводит к забиванию рабочих органов машин (луцильники, культиваторы, плуги, дисковые бороны) и негативно сказывается на качестве обработки.

Цель исследования. Определить размещение рабочих органов по высоте с учетом разрушающего контактного напряжения растительных остатков в виде стерни подсолнечника для повышения эффективности ее заделки в почву.

Материалы и методы. Была разработана конструкция турбодискового культиватора, рассмотрены его устройство и технологический процесс. Для определения разрушающего контактного напряжения растительных остатков рабочими органами применялись методы теоретической механики. Рассматривали стерню подсолнечника в виде упругого вертикального стержня, закрепленного снизу. Был выполнен расчет силы удара по стеблю, а также определены модуль сдвига и плечо действия силы удара по стерне.

Результаты исследования. Получено выражение для определения разрушающего контактного напряжения стерни подсолнечника в процессе вертикальной обработки почвы разработанным турбодисковым культиватором. Предложен способ заделки стерни высокостебельных растений в почву.

Обсуждение и заключение. Для повышения эффективности заделки стерни высокостебельных растений в почву необходимо оптимальное размещение рабочих органов по высоте с учетом начального разрушающего контактного напряжения.

© Припоров И. Е., Курасов В. С., Бацунов В. И., 2025

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

Ключевые слова: турбодисковый культиватор, заделка стерни подсолнечника, разрушающее контактное напряжение, игольчатый диск, вертикальная обработка почвы

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


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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Разрушение стерни подсолнечника лопатками игольчатого диска инновационного турбодискового культиватора. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):750–769. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.750-769>

Breaking Sunflower Stubble by Needle Disk Blades of an Innovative Turbodisc Cultivator

I. E. Priporov , V. S. Kurasov, V. I. Bacunov
I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University,
Krasnodar, Russian Federation

 i.priporov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Vertical tillage is a new resource-saving technology that allows increasing crop yields to 8.5 c/ha and improves soil structure with increased seeding depth for better root system development. For vertical tillage, there are used soil tillers such as turbodisc cultivators. The growing demand on environmental safety of technical means effect on the soil lead to the search for original solutions to reduce energy consumption and preserve soil fertility. Large volumes of crop residues in the fields are difficult to crush that leads to clogging the working bodies of machines (huskers, cultivators, plows, disc harrows) with crop residues and negatively affects the quality of crop residues crushing.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the placement height of the working bodies for breaking sunflower stubble to increase the efficiency of its embedding in the soil.

Materials and Methods. A turbodisc cultivator design has been developed. The cultivator and the technological process of its operation have been examined. Theoretical mechanics was used to determine the degree of breaking plant residues by the working organs of the developed turbodisc cultivator. There was examined sunflower stubble in the form of an elastic vertical rod fixed from below. The force of impact on stubble was calculated. There were determined shear modulus and the impact force arm on the stubble.

Results. There has been found obtained the expression for breaking sunflower stubble during vertical tillage with a developed turbodisc cultivator. There has been proposed a method for embedding stubble of tall-stemmed plants in the soil.

Discussion and Conclusion. To increase the efficiency of embedding stubble of tall crops in the soil, it is necessary to use optimal placement height of the working organs, taking into account the initial breaking degree.

Keywords: turbo disc cultivator, embedding sunflower stubble, breaking, needle disc, vertical tillage

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

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

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

For citation: Priporov I.E., Kurasov V.S., Bacunov V.I. Breaking Sunflower Stubble by Needle Disk Blades of an Innovative Turbodisc Cultivator. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):750–769. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.750-769>

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальная (*Verti-till*) обработка почвы (ВОП) – это новая ресурсосберегающая технология, позволяющая увеличить урожайность до 8,5 ц/га. Ее особенностью является минимизация в структуре слоев почвы с повышенной плотностью заделки семян для развития корневой системы, что дает возможность ей быть засухоустойчивой путем забора влаги из низких горизонтов [1].

Несмотря на распространенность ВОП в США, Республике Беларусь, а также на территории Крыма, в пределах Южного и Северо-Кавказского федеральных округов Российской Федерации она не получила широкого применения. В данных округах используются дискаторы для измельчения.

При внесении растительных остатков (РО) сельскохозяйственных культур в почву появляется проблема по их измельчению. Длина измельченной фракции составляет 15 см. В настоящее время не все почвообрабатывающие машины (ПОМ) способны измельчить высокостебельные культуры (ВСК) [2]. Перспективными являются ПОМ с пассивными рабочими органами [3]. Повышение производительности ПОМ приводит к снижению плодородия почвы [4]. Применяемые ПОМ не измельчают РО высокостебельных культур, поэтому проблема не решена¹. Для мульчирующей обработки почвы в нашей стране и за рубежом применяются орудия, которые имеют дисковые органы². Основным требованием к дисковым орудиям является то, что большинство РО должно находиться в верхнем слое с последующим измельчением лопатками игольчатого диска³.

Игольчатые рабочие органы [5] ПОМ обеспечивают низкое распыление и истирание почвы, не забиваются РО и почвой при повышенной влажности, их тяговое сопротивление ниже по сравнению с другими рабочими органами [6–8].

Цель исследования – повышение эффективности заделки стерни за счет оптимального размещения рабочего органа по высоте с учетом начального разрушающего контактного напряжения стерни высокостебельных растений, например подсолнечника.

Задачи исследования:

1) разработать конструкцию турбодискового культиватора для эффективной заделки стерни подсолнечника;

¹ Лепешкин Н.Д., Точицкий А.А., Козлов Н.С. Измельчение и заделка пожнивных остатков высокостебельных культур. В: Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»; 2015. Т. 2. С. 81–86. <https://elibrary.ru/yrryzh>

² Шварц А.А., Уварова А.Г., Лукин С.Г. Дисковые орудия для поверхностной обработки почвы. В: Современные проблемы и направления развития агроинженерии в России: сб. науч. статей Междунар. науч.-техн. конф. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова; 2021. С. 175–178. <https://elibrary.ru/ycwgung>

³ Лепешкин Н.Д., Мижурин В.В., Филиппов А.И. Требования к рабочим органам агрегата для основной обработки склоновых земель и выбор их типа. В: Современные технологии сельскохозяйственного производства: сб. науч. статей по материалам XXV Междунар. науч.-практ. конф. Гродно: ГТАУ; 2022. С. 89–91. URL: <https://elib.ggau.by/handle/123456789/2921> (дата обращения: 12.02.2025).

- 2) теоретически определить разрушающее контактное напряжение, которое характеризует технологические свойства стерни подсолнечника;
- 3) построить зависимости разрушающего контактного напряжения от массы стерни при разном угле ее отклонения;
- 4) разработать способ заделки стерни высокостебельных растений в почву, исходя из проведенных теоретических исследований разрушающего контактного напряжения.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Д. С. Скоробогатов, Л. А. Лягина разработали метод разрушения тканей сорных растений импульсами высокого напряжения для борьбы с сорной растительностью. Согласно их исследованиям исключается механическая обработка почвы по уничтожению сорняков и переросших культурных растений, а также применение гербицидов, что позволяет производить экологически чистую продукцию. Однако данный метод небезопасен в связи с применением высокого напряжения⁴.

Проведенные В. В. Деревенко, В. В. Овсянниковым, М. А. Артугановым исследования направлены на определение средней удельной работы разрушения семян конопли путем применения метода однократного удара в центробежной рушанке. По мнению исследователей, для максимального разрушения необходимо разрушающее усилие при расположении семянки направить «на ребро», а для минимального – вдоль длинной оси⁵. Разрушение стеблей конопли рабочими органами машины зависит от условий эксплуатации и их состояния [9].

Технические средства для разрушения конопли не пригодны для вертикальной обработки почвы турбодисковым культиватором по измельчению стерни подсолнечника. Измельчение высокостебельных пожнивных остатков (ПО) подсолнечника предложенным катковым измельчителем способствует снижению экономических и энергетических затрат. Для этого поле после уборки обрабатывается в один проход, а полученные остатки соответствуют агротребованиям [2].

Сотрудники Института сельского хозяйства Крыма провели испытания нового экспериментального культиватора ТДКП-2,9 с рабочей шириной захвата 2,9 м. Турбодиски работают по РО любого размера и любой плотности, не забиваются. При этом культиватор вертикально обрабатывает переувлажненную, подмерзшую или пересушенную почву⁶.

Конфигурация наборов орудий по обработке почвы и составляющих их дисков определяет количество и качество проходов для эффективной ее обработки. Если набор параллельных дисков при протягивании сквозь почву и их ось вращения

⁴ Скоробогатов Д.С., Лягина Л.А. Механизм разрушения тканей сорных растений импульсами высокого напряжения. В: Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы XIII Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием. Саратов: Амирит; 2022. С. 156–158. <https://elibrary.ru/iefpxx>

⁵ Деревенко В.В., Овсянников В.В., Артуганов М.А. Влияние влажности семян конопли на их среднюю удельную работу разрушения. В: Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: сб. статей по материалам VII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию кафедры технологии хранения и переработки животноводческой продукции Кубанского ГАУ. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина; 2023. С. 275–279. <https://elibrary.ru/xirsiv>

⁶ В НИИСХ Крыма испытали новый экспериментальный культиватор ТДКП-2,9. URL: <https://dzen.ru/a/YGttVX4fMSm7Pd5H> (дата обращения: 21.01.2025).

перпендикулярны направлению тяги, то они не эффективны. Для устранения этого недостатка ученые изменяют угол ориентации набора, что приводит к осложнениям. При увеличении угла остаются большие глыбы почвы, что приводит к множеству проходов по измельчению. Боковое давление глыбы почвы на диск с вогнутостью приводит к поломке. Для увеличения силы диск изготавливают более вогнутым, что способствует образованию уплотненного слоя [10]. Однако данные орудия обладают недостатками. Для обработки и резки ПО требуется множество проходов по площади, что приводит к затратам времени и топлива. Таким образом, фермер несет убытки. Известные ПОМ ограничены скоростью до 9,7 км/ч. При ее увеличении орудие поднимается вертикально и происходит вхождение режущей пластины в почву на 7,62–15,24 см. Диски неэффективно ее обрабатывают. Если пластины остаются в почве, то растёт повреждение пластины, вследствие давления диска на почву при больших скоростях.

Серийные культиваторы уплотняют почву. При уплотнении сила сдерживает прорастание растений, рост корней и урожайность культуры. В период недостаточного поглощения воды при наличии уплотненного слоя необходимо провести вспашку [10].

При обработке почвы дисковыми батареями в рабочих органах отсутствует проверка их работы в реальном времени и заделки ПО игольчатыми дисками [11; 12], а также подбора высоты лопаток на нем и изменения ширины междурядья для сельскохозяйственной культуры [13; 14].

Таким образом, возникает необходимость в ПОМ, которая за один проход перемещается с большими скоростями⁷ без повреждения дисков и уплотнения слоя⁸ [10], а также в возможности проверки работы в реальном времени и заделки ПО игольчатыми дисками [15; 16].

Для расширения технологических возможностей дискового почвообрабатывающего рабочего органа при подрезании ПО на легких и тяжелых почвах предложено отогнуть периферийную часть диска от ступицы с образованием усеченного конуса. Рифления выполнены тангенциально, заточка режущей кромки перпендикулярна к оси вращения рабочего органа, а износостойкий материал нанесен по всей ее длине [17]. В данном рабочем органе отсутствует проверка его действия в реальном времени.

Для снижения тягового сопротивления и повышения эффективности поверхностного рыхления стерни и уничтожения сорной растительности при дисковании необходимо установить на каждую пару вращающихся рифленых и игольчатых дисков иглы под углом 15–25° к зубчатым лопаткам. Стойки имеют С-образную форму [18].

В дисковой батарее отсутствует проверка заделки ПО игольчатыми дисками, подбора высоты лопаток на нем и изменения ширины междурядья для сельскохозяйственной культуры (например, подсолнечника).

⁷ Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Исследование технических характеристик турбодисковых культиваторов для вертикальной обработки почвы. В: Инженерное обеспечение сельского хозяйства: проблемы, достижения, перспективы: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию освоения целинных и залежных земель в Алтайском крае. Барнаул: РИО Алтайского ГАУ; 2024. С. 70–72. <https://elibrary.ru/lfnajy>

⁸ Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Совершенствование турбодисковых культиваторов для вертикальной обработки почвы. В: Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: материалы V Национальной науч.-практ. конф. Керчь: Керченский государственный морской технологический университет; 2024. С. 90–93. <https://elibrary.ru/jlqkmd>

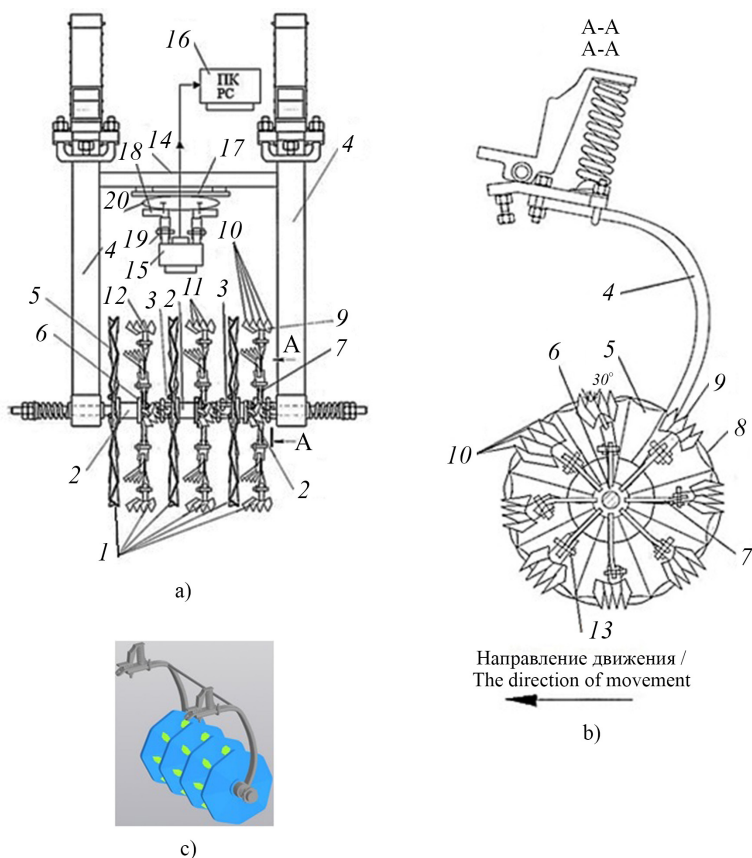
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Технологический процесс ВОП разработанным турбодисковым культиватором (ТДК) для заделки пожнивных остатков длинностебельных культур [19].

Материалы

Разработанный ТДК представлен на рисунке 1.



Р и с. 1. Конструктивно-технологическая схема турбодискового культиватора:
 а) общий вид; б) вид сбоку: 1 – диски; 2 – батарея; 3 – шарниры; 4 – стойка;
 5 – рифленные диски; 6 – игольчатые диски; 7 – игла; 8 – окружность; 9 – лопатки зубчатые;
 10 – вершина; 11 – впадина; 12 – скребок; 13, 19 – стопорные болты; 14 – рама;
 15 – мультимедийное устройство; 16 – персональный компьютер; 17 – каретки;
 18 – телескопические стойки; 20 – механизм поворотный; в) 3D-модель

Fig. 1. Design and technological scheme of the turbo-disc cultivator:
 а) general view; б) side view: 1 – discs; 2 – battery; 3 – hinges; 4 – rack; 5 – grooved discs;
 6 – needle discs; 7 – needle; 8 – circle; 9 – toothed blades; 10 – vertex; 11 – cavity;
 12 – scraper; 13, 19 – locking bolts; 14 – frame; 15 – multimedia device;
 16 – personal computer; 17 – carriages; 18 – telescopic racks; 20 – rotary mechanism; в) 3D-model

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

Note: PC – personal computer; A – view; A-A – section.

Источник: рисунки 1, 3–7 составлены авторами статьи.

Source: the diagrams 1, 3–7 were compiled by the authors of the article.

ТДК содержит диски 1, которые собраны в батарею 2 с помощью крестообразных шарниров 3 и установлены на подпружиненных стойках 4. Каждая пара дисков 1 содержит рифленные 5 и игольчатые 6 диски с иглами 7 под углом 15–25°, расположенные по окружности 8, с зубчатыми лопатками 9. Стойки 4 С-образные, игла круглая. Лопатки 9 имеют четыре вершины 10 и три впадины 11, которые выполнены по синусоидальной кривой, потому что при разном диаметре стерни подсолнечника (5...7 см) или кукурузы (2...6 см) необходимо разное количество лопаток. Одна вершина лопатки приходится на 1 см диаметра стерни (в зависимости от сельхозкультуры). Синусоидальная кривая была выбрана, потому что при набегании впадины на камень происходит его проскальзывание, а вершина 10 лопатки 9 работает по стерне. Расстояние между игольчатыми дисками 6 равно ширине междурядья стерни, регулируемое по высоте и ширине междурядья в зависимости от сельхозкультуры. Конфигурация лопаток игольчатого диска выбрана на основе ранее проведенных нами исследований. Количество волнистых дисков на предложенном турбодисковом культиваторе составляет четыре, исходя из ширины его захвата (3 м).

Количество лопаток 9 на игольчатом диске 6 равно диаметру стерни сельхозкультуры после комбайновой уборки, например, подсолнечника, кукурузы. Угол раствора вершины 10 доходит до 30°. При угле меньше 30° лопатка проскальзывает и ударяет, а при большем угле происходит удар по стерне и выкорчевывание ее без заделывания в почву, что приводит к нарушению технологического процесса работы диска 6. Лопатки 9 в виде скребка 12 с режущей кромкой направлены по ходу движения дисковой батареи. При этом поверхность ее ребер имеет коэффициент трения, который превышает коэффициент по стерне сельхозкультуры. Для обеспечения крепления к игле 7 ее основание (вогнутая полусфера) состоит из частей и соединена стопорными болтами 13. На лопатки 9 приклеена абразивная крупнозернистая бумага из тканевой основы. На подпружиненных стойках 4 батареи по центру расположена установка для контроля технологического процесса заделки ПО. Она состоит из рамы 14, на которой имеется мультимедийное устройство (ММУ) 15, совершающее перемещение и вращение с помощью каретки 17 с поворотным механизмом 20. Механизм сообщен с ММУ 15 через Г-образные телескопические стойки 18.

Технологический процесс работы турбодискового культиватора

При обработке почвы диски 1, которые собраны в батарею 2 посредством крестообразных шарниров 3, установлены на С-образных стойках 4 с помощью пружины и винтового механизма (не показано). При обработке почвы действует переменная сила сопротивления, зависящая от рельефа и физико-механических свойств почвы, наличия ПО стерневого фона (рис. 1). Каждая пара дисков 1 содержит рифленный 5 и игольчатый 6 (с установленными под углом по окружности 8 иглами 7). Диски, перемещаясь в почве, совершают вращательное движение, приводящее к перетиранию ПО между дисками 1 (рис. 1).

Оператор проводит контроль заделки длинностебельных культур на всем пути обработки. Посредством ММУ 15 полученное изображение их заделки на поле подают на компьютерную обработку с программным обеспечением Mathcad для определения качества заделки, которое должно соответствовать агротехническим требованиям, иначе тракторист дополнительно проводит заделку.

В патенте приведена обработка изображения на компьютере с помощью программы Mathcad [20]. Для компьютерной обработки вместе с объектами в цветном изображении с расширением файла .jpg и разрешающей способностью не ниже 600 dpi на дюйм в программу Mathcad вводят площадь внутренней поверхности рамки в миллиметрах, средний размер пожнивных остатков, их длину и диаметр в миллиметрах, а также общее их количество внутри рамки до заделки. После оцифровки изображения выбирают матрицу плоской поверхности и одного объекта в синем цвете. Определяют масштабный коэффициент для корреляции размеров плоской поверхности пожнивных остатков почвы (мм), выраженных в миллиметрах, с матрицей плоской поверхности и одного объекта (пиксели). Эффективность заделки пожнивных остатков оценивается по коэффициенту, который рассчитывается как отношение их количества на плоской поверхности до и после заделки их в почву.

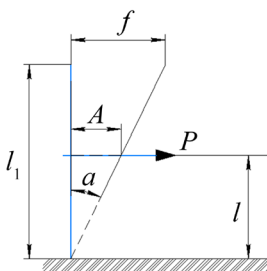
Техническое преимущество данного орудия заключается в снижении тягового сопротивления с одновременным повышением качества и контролируемости их заделки, а также в расширении его функциональных возможностей.

Методы

Разрушающее контактное напряжение, характеризующее технологические свойства стерни подсолнечника, определялось в соответствии с законами механики.

В работе Т. А. Погорова стебель рассматривается как упругий вертикальный стержень с закреплением снизу (рис. 2) [21]. Агротехнические практики, применяемые в США, демонстрируют, что оставление в поле ПО являются средством защиты почв от эрозии [2]. Вид поля с оставшимися стеблями подсолнечника после его уборки [2] при образовании стерни приведен на рисунке 3.

Определим разрушающее контактное напряжение стерни подсолнечника после уборки.



Р и с. 2. Схема отклонения стебля под действием силы

F i g. 2. The scheme of deflection of the stem under the impact force

Примечание: P – сила удара, Н; ℓ – плечо действия силы удара, мм; ℓ_1 – длина, мм; f – максимальный поперечный изгиб стебля, м; A – расстояние, на которое отклонился стебель после воздействия силы удара, мм; α – угол его отклонения, град.

Note: P – impact force, N; ℓ – impact force arm, mm; ℓ_1 – length, mm; f – maximum transverse bending of the stem, m; A – distance at which the stem deflected by the impact force, mm; α – deflection angle, degrees.

Источник: рисунок составлен авторами статьи по материалам исследования Т. А. Погорова [21].

Source: the diagram was compiled by the authors of the article based on the materials of the thesis abstract [21].



Р и с. 3. Вид оставшихся стеблей после уборки подсолнечника (адаптировано из [2])

F i g. 3. The view of the stems remaining after harvesting sunflowers (adapted from [2])

Формула для расчета силы удара по стеблю в виде стерни [21]:

$$P = \frac{3}{2} \frac{ED_2^3 \sigma_p A}{\ell^3}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, Па; D_2 – диаметр стерни подсолнечника, мм; σ_p – разрушающее контактное напряжение, характеризующие технологические свойства стерни, Па; A – расстояние, на которое отклонился стебель после воздействия силы удара, мм; ℓ – плечо действия силы удара, мм.

Также Т. А. Погоровым представлена формула, позволяющая вычислить силу P , которая ударяет по стеблю (рис. 4) [21]. Тогда

$$P = \frac{1}{4} m \omega^2 A, \quad (2)$$

где m – масса стебля, кг; ω – угловая скорость⁹ при колебательном движении частиц стебля, рад/с.

Приравнявая выражения (1) и (2), выразим разрушающее контактное напряжение (3):

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \frac{ED_2^3 \sigma_p A}{\ell^3} &= \frac{1}{4} m \omega^2 A; \\ \sigma_p &= \frac{0,17 m \omega^2 \ell^3}{ED_2^3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Угловая скорость при колебаниях стебля определяется из следующего выражения¹⁰:

⁹ Федоров В.В. Снижение потерь семян подсолнечника при комбайновой уборке разработкой и применением стеблеподъемника с эластичными улавливателями. автореф. дисс... канд. техн. наук. Пенза; 2013. 19 с.

¹⁰ Там же.

$$\omega = \frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{G}{\gamma}}, \quad (4)$$

где G – модуль сдвига, Па; γ – линейная плотность стебля, кг.

$$\gamma = \frac{\delta}{g}, \quad (5)$$

где δ – удельный его вес, Н; g – ускорение свободного падения, м/с².

Модуль сдвига стебля определяется из выражения:

$$p^* = G \frac{A}{\ell}, \quad (6)$$

где p^* – предельное его напряжение, Па ($p^* = 8 \text{ Па}$)¹¹.

Выразим из (6) модуль сдвига G :

$$G = \frac{\ell}{A} p^*. \quad (7)$$

Согласно рисунку 4

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A}{\ell}, \quad (8)$$

тогда выражение (7) будет

$$G = \frac{p^*}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (9)$$

Согласно рисунку 2 угол, на который отклонен стебель, определяется следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f}{\ell_1}; \quad (10)$$

$$\ell_1 = \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (11)$$

Так как $\ell = \frac{1}{4} \ell_1$, то

$$\ell = \frac{f}{4 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (12)$$

Подставим выражения (9), (12) в (4) и получим

$$\omega = \frac{4 \operatorname{tg} \alpha}{f} \sqrt{\frac{g p^*}{\delta \operatorname{tg} \alpha}}; \quad (13)$$

¹¹ Федоров В.В. Снижение потерь семян подсолнечника при комбайновой уборке разработкой и применением стеблеподъемника с эластичными улавливателями.

$$\omega = \frac{4 \cdot 2,828}{f} \sqrt{\frac{gtg\alpha}{\delta}},$$

$$\omega = \frac{11,312}{f} \sqrt{\frac{gtg\alpha}{\delta}}. \quad (14)$$

Коэффициент 11,312 находится путем математического преобразования выражения (13). Тогда из выражения (3) с учетом (9), (12) выводится следующая зависимость

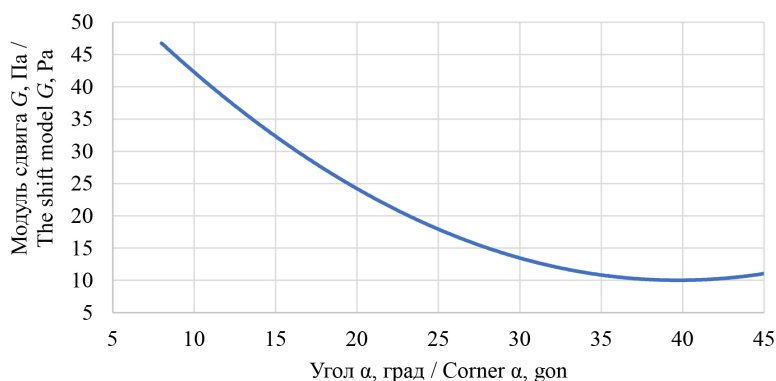
$$\sigma_p = \frac{0,34mg \frac{f}{tg^2\alpha}}{ED_2^3\delta}. \quad (15)$$

Анализ выражения (15) показывает, что разрушающее контактное напряжение зависит от физико-механических свойств стерни подсолнечника и угла ее наклона относительно почвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты теоретических исследований

Зависимость модуля сдвига от угла наклона стерни приведена рисунке 4. График построен при начальном предельном напряжении стерни подсолнечника.

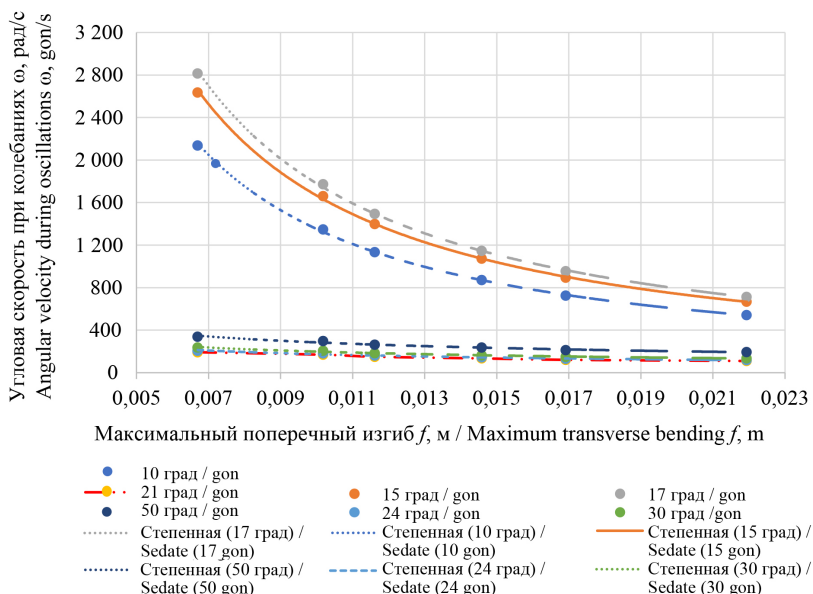


Р и с. 4. Зависимость модуля сдвига от угла отклонения стебля
F i g. 4. Dependence of the shear modulus on the angle of stem deflection

Увеличение угла отклонения стебля после уборки приводит к снижению модуля сдвига (рис. 4).

Зависимость угловой скорости при колебаниях стебля от максимального поперечного его изгиба приведена на рисунке 5. Увеличение максимального поперечного изгиба с 0,0067 до 0,0219 м приводит к снижению угловой скорости при его колебаниях. В свою очередь, повышение угла отклонения стебля приводит к снижению угловой скорости в среднем с 1125,8 до 256,7 рад/с.

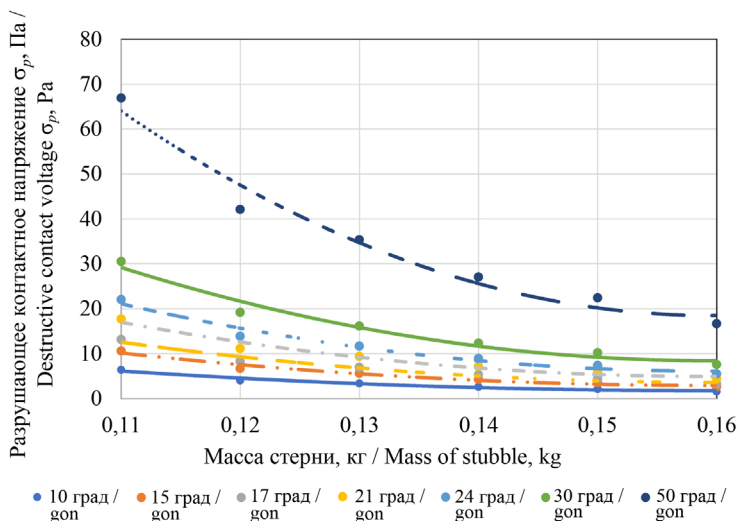
Зависимость на рисунке 5 построена при начальных значениях удельного веса стебля от 1,07 до 1,57 Н/м.



Р и с. 5. Зависимость угловой скорости при колебаниях стебля от максимального поперечного его изгиба с разным углом отклонения

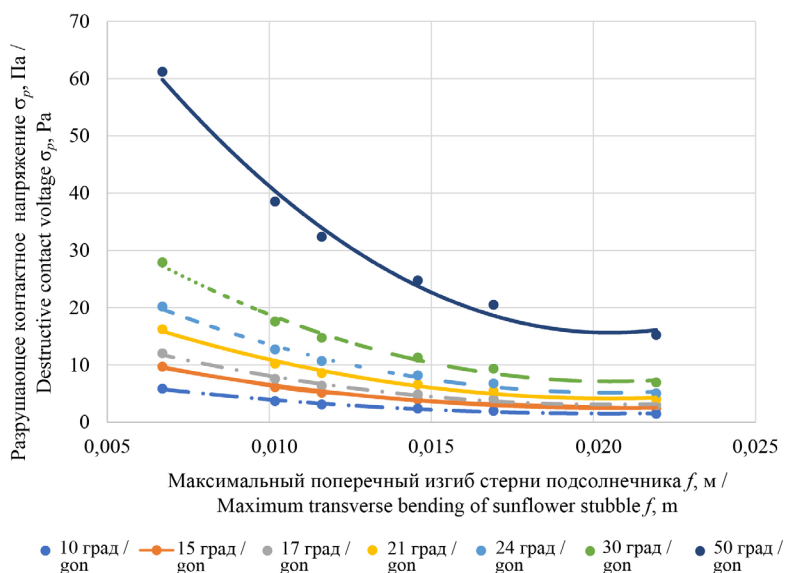
F i g. 5. Dependence of the angular velocity of the stem oscillations on its maximum transverse bending at different angles of deflection

Представим зависимость разрушающего контактного напряжения от физико-механических свойств стерни, а именно массы стерни (рис. 6) и максимального поперечного ее изгиба (рис. 7).



Р и с. 6. Зависимость разрушающего контактного напряжения от массы стерни подсолнечника

F i g. 6. Dependence of the breaking on the mass of sunflower stubble



Р и с. 7. Зависимость разрушающего контактного напряжения от максимального поперечного изгиба стерни подсолнечника при разном значении модуля упругости стерни и постоянном угле отклонения

Fig. 7. Dependence of the breaking on the maximum transverse bending of sunflower stubble at different values of the stubble modulus of elasticity and a constant angle of deflection

Анализ зависимостей на рисунке 7 показывает, что разрушающее контактное напряжение снижается при росте максимального поперечного изгиба стерни подсолнечника. Повышение угла наклона стерни подсолнечника приводит к увеличению разрушающего контактного напряжения с уменьшением максимального поперечного изгиба стерни подсолнечника.

Исходя из этого, предложен способ заделки стерни высокостебельных растений в почву [16].

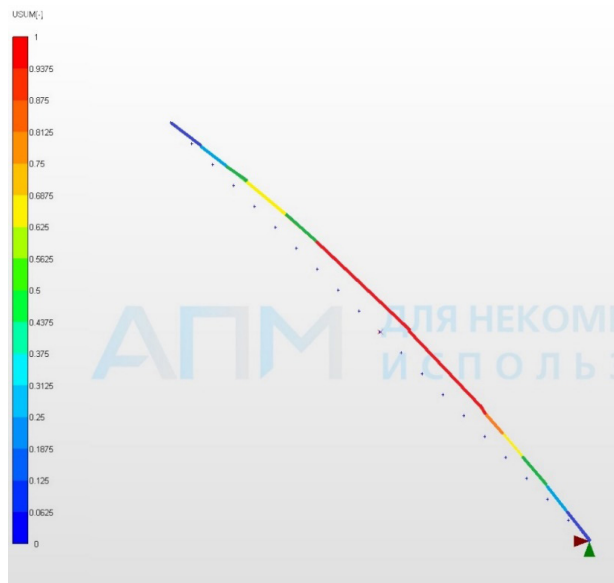
Проверка теоретических исследований

Сущность предложенного способа заделки стерни высокостебельных растений в почву поясняется с помощью чертежа. На рисунке 8 приведена карта распределения эквивалентных разрушающих контактных напряжений с процентным соотношением длины стержня, соответствующей длине стерни высокостебельных растений (СВСР). На рисунке 9 серийный почвообрабатывающий агрегат (ПОА), выпускаемый фирмой Salford.

Способ заделки СВСР в почву осуществляется следующим образом:

- пригиб стерни и удержание стеблей в горизонтальном положении;
- измельчение на фракции и обработка почвы без оборота после процесса измельчения рабочими органами;
- продольный разрез перед измельчением СВСР, отделение побегов и корневой системы от стерни;
- предварительное определение по формуле (15) начального разрушающегося контактного напряжения СВСР при ее изгибе;

- получение цветного изображения СВСП после уборки посредством мультимедийного устройства, его перевод на компьютер и обрисовка контура полученного цветного изображения в программе Компас 3D V18 с разрешением файла cdw;
- загрузка обработанного изображения в программу APM WinMachine с модулем APM SHAFT;
- получение модели стерни в виде стержня, жестко закрепленного в нижней точке;
- нагружение стержня по найденному значению начального разрушающего напряжения при изгибе;
- моделирование нагрузки на стержень, которая равномерно распределена по всей его длине;
- статический расчет стержня и получение результатов расчета стержня в виде карты распределения (рис. 9) эквивалентных разрушающих напряжений с процентным соотношением длины стержня, соответствующей длине стерни и цветными участками стержня;
- подбор высоты размещения рабочего органа (рис. 10), в качестве которого используют батарею дисков, состоящую из волнистых дисков, между которыми размещают игольчатый диск с лопатками для разрушения стерни согласно цвету по карте распределения эквивалентных разрушающих напряжений.



Р и с. 8. Карта распределения эквивалентных разрушающих контактных напряжений с процентным соотношением длины стержня, соответствующей длине стерни высокостебельных растений

F i g. 8. Map of the distribution of breaking with a percentage of the rod length corresponding to the length of the stubble of tall plants

Источник: снимок сделан в программе APM WinMachine.

Source: the picture was taken in the program APM WinMachine.



Р и с. 9. Серийный почвообрабатывающий агрегат фирмы Salford

F i g. 9. Series-produced tillage unit of the company Salford

Источник: изображение взято из сайта: <https://clck.ru/3Pj7CR>.

Source: the photo is taken from the website: <https://clck.ru/3Pj7CR>.

Выполнение технологических операций в способе заделки СВСР в почву позволяет повысить эффективность ее заделки за счет оптимального размещения рабочего органа по высоте с учетом начального разрушающего контактного напряжения.

Пример осуществления заделки стерни высокостебельных растений и определение эквивалентного разрушающего напряжения

При движении почвообрабатывающего агрегата (рис. 9) его рабочие органы пригибают СВСР после уборки комбайном и удерживают ее в горизонтальном положении [2]. На батаре с волнистыми дисками размещены игольчатые диски с лопатками для разрушения стерни. По карте распределения определяют эквивалентное разрушающее напряжение исходя из цвета.

Рассмотрим пример со следующими начальными данными (15): $m = 0,11$ кг; $g = 9,81$ м/с²; $f = 0,0067$ м; $\alpha = 50^\circ$; $\delta = 1,0791$ Н; $E = 0,015$ Па; $D = 0,022$ м;

$$\sigma_p = \frac{0,34 \cdot 0,11 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,0067}{\tan^2 50}}{1,0791 \cdot 0,015 \cdot 0,022^3} = 66,9 \text{ Па.}$$

Исходя из процентного соотношения длины стержня (0,25...0,60 %), при средней длине стерни 38 мм игольчатый диск с лопатками ПОА (например, ТДК) должен размещаться на высоте 9,5...22,8 мм от поверхности почвы при данном разрушающем напряжении при изгибе 16,73...40,14 Па. Стерня на поверхности почвы измельчается игольчатым диском с лопатками, волнистый диск ТДК входит в почву вертикально и обрабатывает почву без перемешивания слоев.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ заделки СВСП в почву более перспективен указанного в патентах [22; 23].

Известный способ совмещения измельчения высокостебельных пожнивных остатков и обработки почвы включает несущую систему, плоскорежущую лапу, барабан-измельчитель и установленное перед измельчителем пригибающее устройство, осуществляющее пригиб растительных остатков вниз, удержание их для изменения, рыхление почвы без оборота после процесса измельчения.

К недостаткам такого метода относится то, что стебли растительных остатков измельчаются поперечным резанием на отдельные фракции, а агрегат, производя поперечную их разделку, не осуществляет продольный разрез, не производит равномерной заделки их в обработанный слой, что ведет к продолжительному процессу перехода измельченных остатков в питательные вещества для последующих культур [22].

Известен способ заделки в почву трудноизмельчаемых растительных остатков, характеризующийся тем, что растительные остатки с поверхности поля смещаются в открытую плугом борозду, уплотняются колесами трактора, движущимися по борозде, после чего плужные корпуса с углосниками засыпают их почвой [23].

Также существуют способы и орудия для глубокой заделки (запашки) стерни плугом, оборудованным предплужниками или плужными корпусами с углосниками. При этом стерня предварительно измельчается, как правило, одновременно с уборкой комбайнами, оборудованными измельчителями.

Существенным недостатком способа является снижение надежности почвообрабатывающей техники, вызванное наличием неизмельченных стеблей. Происходит забивание плуга растительными остатками. Стебли льна масличного по физико-механическим свойствам отличаются от стеблей зерновых культур. Значительная их часть заполнена волокнистой тканью, оказывающей большое сопротивление срезу. Поэтому попытки использования приспособлений к комбайну для измельчения и разбрасывания стерни льна равномерно по поверхности поля не привели к желаемому результату. Из-за наличия в таких приспособлениях вращающихся ножей волокнистые стебли льна наматываются на них, происходит их забивание, что часто приводит к возгоранию массы стеблей. Поэтому во время уборки стерни и растительные остатки укладываются в валок за комбайном, что создает препятствия для дальнейшей обработки почвы под следующую (по севообороту) культуру. При этом в случае сева озимых рекомендуется не заделывать волокнистую солому в почву, а немедленно удалять ее с поля и сразу же начинать готовить почву под посев. Удалять солому рекомендуется с помощью тракторных волокуш или рулонных прессов с последующей вывозкой рулонов на шпигатные фабрики для переработки в волокно. Однако из-за малочисленности таких фабрик в настоящее время рекомендуемый способ удаления с поля стеблей льна экономически нецелесообразен [23].

При средней длине стерни подсолнечника 38 мм разрушающее контактное напряжение составляет 66,9 Па; при длине 9,5...22,8 мм разрушающее напряжение – 16,73...40,14 Па. Качество заделки стерни подсолнечника согласно патенту [22] составляет 88,3 %, а по предложенному способу – 92,5 %.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Получено выражение, определяющее разрушающее контактное напряжение в зависимости от физико-механических свойств стерни подсолнечника и угла его наклона относительно почвы.

2. Разрушающее контактное напряжение снижается при повышении максимального поперечного изгиба стерни подсолнечника. Увеличение угла ее наклона приводит к росту разрушающего контактного напряжения с уменьшением максимального поперечного изгиба стерни подсолнечника.

3. Предложен способ заделки стерни высокостебельных растений в почву [16], который позволяет повысить эффективность ее заделки с 88,3 до 92,5 % за счет оптимального размещения рабочего органа по высоте с учетом начального разрушающего контактного напряжения стерни.

4. Работу лопаток игольчатого диска на турбодисковом культиваторе и разработанного культиватора в целом необходимо проверить в производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболевский И.В. Бионическое обоснование конструкции почвообрабатывающих рабочих органов дисковой бороны. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2019;(19):73–84. <https://elibrary.ru/aizmod>
2. Борисенко И.Б., Скрипкин Д.В., Мезникова М.В., Тимошенко В.В., Элбакян А.Ж. Катковый измельчитель пожнивных остатков высокостебельных сельскохозяйственных культур. *Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса*. 2022;(2):329–339. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-41>
3. Козлов Н.С. Обзор и анализ конструкций рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов для измельчения растительных остатков. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017;(1):123–125. <https://elibrary.ru/zbatat>
4. Точицкий А.А., Лепешкин Н.Д., Костюков П.П., Козлов Н.С. Почвовлагосберегающие технологии и средства механизации обработки легких почв в Республике Беларусь. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2012;(46):3–10. URL: <https://mechel.belar.by/jour/article/view/219/221> (дата обращения: 10.02.2025).
5. Алиакберов И.И., Яхин С.М., Нуриев Л.М. Обоснование параметров эллипсовидного игольчатого диска почвообрабатывающего орудия. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021;16(2):65–69. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-65-69>
6. Samadalashvili A. The Batch-Combined Minimum Tillage Farming Machine. *Mechanization in Agriculture*. 2015;61(3):6–10. URL: <https://stumejournals.com/journals/am/2015/3/6> (дата обращения: 10.08.2025).
7. Petrov A.M., Ivanayskiy S.A., Kanaev M.A., Parfyonov O.M., Ivanayskiy M.S. Justification of Optimal Design and Technological Parameters of Needle Discs of the Combined Working Body. *Bio Web of Conferences*. 2020;17:00016. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700016>
8. Рзалиев А.С., Бекмухаметов Ш.Б., Голобородько В.П., Абдикаиров А.А., Бегалы Д.К., Боранбаев Б.Е. Комбинированное орудие для основной полосовой обработки почвы по технологии Strip-Till в условиях юга Казахстана. *Успехи современного естествознания*. 2019;(7):26–32. URL: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2019/7/37155.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).
9. Маринченко И.А. Исследование стеблей конопли как объекта разрушения. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2014;(4):87–91. <https://elibrary.ru/tilgap>
10. Ковач М.Д., Мейнерс Т.Д., Ноблоч Д.А., Кромминга Г.Д., Смарт Г.С. Система и способ для вертикальной обработки почвы с неглубокими дисковыми ножами. Патент 2529910 Российская Федерация. 10 октября 2014. <https://elibrary.ru/uffcjj>

11. Курасов В.С., Припоров И.Е., Бацунов В.И. Энергетическая оценка турбодисковых культиваторов для вертикальной обработки почвы. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2024;(5):164–168. <https://elibrary.ru/faiyaq>
12. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Энергетическая оценка турбодисковых культиваторов для вертикальной обработки почвы. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024;(4):65–71. <https://elibrary.ru/faiyaq>
13. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Исследование технических характеристик турбодисковых культиваторов с волнистым диском. *АПК России*. 2024;31(5):701–705. <https://elibrary.ru/cuzmwh>
14. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Анализ технических характеристик турбодисковых культиваторов для вертикальной обработки почвы. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2025;(2):100–105. <https://elibrary.ru/dxfych>
15. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И. Способ измельчения высокостебельных пожнивных остатков и обработки почвы. Патент 2838202 С1 Российская Федерация. 14 апреля 2025. <https://elibrary.ru/qclxnr>
16. Припоров И.Е., Курасов В.С., Бацунов В.И., Богданов Р.П. Способ заделки стерни высокостебельных растений в почву. Патент 2838205 С1 Российская Федерация. 14 апреля 2025. <https://elibrary.ru/yksdmi>
17. Митин Е.Ф. Дисковый почвообрабатывающий рабочий орган. Патент 1542434 А1 СССР. 15 февраля 1990. <https://elibrary.ru/gsaqiq>
18. Бабицкий Л.Ф., Соболевский И.В. Почвообрабатывающая дисковая батарея. Патент 173238 Российская Федерация. 17 августа 2017. <https://elibrary.ru/ehvtoi>
19. Припоров И.Е., Бачу Т.Н., Курасов В.С., Цыбулевский В.В., Бацунов В.И., Курносова Н.С. Почвообрабатывающая дисковая батарея для заделки пожнивных остатков длинностебельных культур. Патент 2825223 Российская Федерация. 22 августа 2024. <https://elibrary.ru/yaumkg>
20. Цыбулевский В.В., Припоров И.Е., Самурганов Г.Е., Золотарев К.В. Способ определения качества заделки пожнивных остатков в почву в реальном времени. Патент 2693644 С1 Российская Федерация. 3 июня 2019. <https://www.elibrary.ru/usukpq>
21. Погорцов Т.А. Теоретическое обоснование бесподпорного резания стеблей растений шнековым режущим аппаратом с горизонтальной осью вращения. *Научный журнал НИИ проблем мелиорации*. 2016;(2):177–191. <https://elibrary.ru/vwzllt>
22. Рыков В.Б., Таранин В.И., Пантюхов И.В. Способ совмещения измельчения высокостебельных пожнивных остатков, сорняков и основной глубокой обработки почвы и агрегат для его осуществления. Патент 2195798 Российская Федерация. 10 января 2003. <https://elibrary.ru/hrchqf>
23. Волобуев В.А., Ревенко В.Ю., Белоусов М.М. Способ и устройство для заделки в почву трудноизмельчаемых растительных остатков. Патент 2546899 Российская Федерация. 10 апреля 2015. <https://elibrary.ru/zfgivn>

REFERENCES

1. Sobolevsky I.V. Bionic Substantiation of the Design of the Soil Processing Working Bodies of the Disk Harrow. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2019;(19):73–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/aizmod>
2. Borisenko I.B., Skripkin D.V., Meznikova M.V., Timoshenko V.V., Elbakyan A.J. Roller Shredder for Stubble Residues of High-Stemmed Crops. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2022;(2):329–339. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-41>
3. Kozlov N.S. [Review and Analysis of Structures of Working Bodies of Tillage Units for Crushing Plant Residues]. *Vestnik Belorusskoi Gosudarstvennoi Sel'skokhozyaystvennoi Akademii*. 2017;(1):123–125. (In Russ.) <https://elibrary.ru/zbatat>
4. Tochitsky A.A., Lepeshkin N.D., Kostyukov P.P., Kozlov N.S. [Soil- and Moisture-Saving Technologies and Means of Mechanization of Light Soil Treatment in the Republic of Belarus]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2012;(46):3–10. (In Russ.) Available at: <https://mechel.belar.by/jour/article/view/219/221> (accessed 10.02.2025).

5. Aliakberov I.I., Yakhin S.M., Nuriev L.M. Description of the Parameters of the Ellipse Needle Disc of the Soil Processing Tool. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2021;16(2):65–69. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-65-69>
6. Samadalashvili A. The Batch-Combined Minimum Tillage Farming Machine. *Mechanization in Agriculture*. 2015;61(3):6–10. Available at: <https://stumejournals.com/journals/am/2015/3/6> (accessed 10.08.2025).
7. Petrov A.M., Ivanayskiy S.A., Kanaev M.A., Parfyonov O.M., Ivanayskiy M.S. Justification of Optimal Design and Technological Parameters of Needle Discs of the Combined Working Body. *Bio Web of Conferences*. 2020;17:00016. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700016>
8. Rzaliev A.S., Bektukhmetov Sh.B., Goloborodko V.P., Abdikairov A.A., Begaly D.K., Boranbaev B.E. Combined Tool for Main Strip Tillage by Strip-Till Technology in the Conditions of South Kazakhstan. *Advances in Current Natural Sciences*. 2019;(7):26–32. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2019/7/37155.pdf> (accessed 12.02.2025).
9. Marinchenko I.A. Research of the Hemp Stems as Object Destruction. *Vestnik Khersonskogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2014;(4):87–91. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/tilgap>
10. Kovach M.D., Mejners T.D., Nobloch D.A., Kromminga G.D., Smart G.S. System and Method of Vertical Soil Treatment with Shallow Disc Blades. Patent 2529910 Russian Federation. 2014 October 10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/uffcjj>
11. Kurasov V.S., Priporov I.E., Batsunov V.I. Energy Assessment of Turbodisc Cultivators for Vertical Tillage. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2024;(5):164–168. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/faiyaq>
12. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I. Energy Assessment of Turbodisc Cultivators for Vertical Tillage. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2024;(4):65–71. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/faiyaq>
13. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I. [Investigation of the Technical Characteristics of Turbodisc Cultivators with a Wavy Disk]. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2024;31(5):701–705. (In Russ.) <https://elibrary.ru/cuzmwh>
14. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I. Analysis of Technical Characteristics of Turbo-Disc Cultivators for Vertical Tillage. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025;(2):100–105. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/dxfych>
15. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I. Method of Crushing Tall Crop Residues and Soil Treatment. Patent 2838202 C1 Russian Federation. 2025 April 14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/qclxnr>
16. Priporov I.E., Kurasov V.S., Batsunov V.I., Bogdanov R.P. Method of Stubble Embedding of Tall Plants into Soil. Patent 2838205 C1 Russian Federation. 2025 April 14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/yksdmi>
17. Mitin E.F. [Disk Tillage Working Body]. Patent 1542434 A1 USSR. 1990 February 15. (In Russ.) <https://elibrary.ru/gsaqiq>
18. Babitsky L.F., Sobolevsky I.V. [Tillage Disk Battery]. Patent 173238 Russian Federation. 2017 August 17. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ehvtio>
19. Priporov I.E., Bachu T.N., Kurasov V.S., Tsybulevskij V.V., Batsunov V.I., Kurnosova N.S. Soil-Cultivating Disc Battery for Embedding Crop Residues of Long-Stem Crops. Patent 2825223 Russian Federation. 2024 August 22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/yaumkg>
20. Tsybulevskij V.V., Priporov I.E., Samurganov G.E., Zolotarev K.V. Method for Determination of Quality of Tillage in Soil in Real Time. Patent 2693644 C1 Russian Federation. 2019 June 3. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/usukpq>
21. Pogorov T.A. Theoretical Substantiation of Without-Prop Cutting of Plant Stems by Screw Cutting Apparatus with Horizontal Rotation Axis. 2016;(2):177–191. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/vwzllt>
22. Rykov V.B., Taranin V.I., Pantjukhov I.V. Method and Apparatus for Combined Grinding of Stubble Remains, Weeds and Deep Soil Tillage. Patent 2195798 Russian Federation. 2003 January 10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/hrchqf>
23. Volobuev V.A., Revenko V.J., Belousov M.M. Method and Device for Embedding Into Soil of Hard-Crushed Plant Residues. Patent 2546899 Russian Federation. 2015 April 10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/zfgivn>

Об авторах:

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

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

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

Вклад авторов:

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

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

About the authors:

Igor E. Priporov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Tractors, Automobiles and Technical Mechanics, I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8201-2819>, Researcher ID: N-4901-2016, Scopus ID: 57214999941, SPIN-code: 4330-0224, i.priporov@yandex.ru

Vladimir S. Kurasov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Tractors, Automobiles and Technical Mechanics, I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1733-9436>, SPIN-code: 7925-1853, kurasoff@gmail.com

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

Authors contribution:

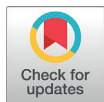
I. E. Priporov – formulating the study idea, goals and objectives; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, making comments and corrections by members of the research group including at the stages before and after publication.

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


V. I. Batsunov – conducting the study, including data collection; preparing a manuscript: visualizing the study results and data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 22.04.2025; revised 20.10.2025; accepted 14.11.2025

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>EDN: <https://elibrary.ru/xddvim>

УДК / UDK 62:63

*Оригинальная статья / Original article***Технико-экономическое обоснование применения
аддитивных технологий при восстановлении
сельскохозяйственной техники****П. В. Сенин, М. Н. Чаткин, Е. А. Кильмьяшкин** *Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,
г. Саранск, Российская Федерация* 40252@mail.ru*Аннотация*

Введение. Современная сельскохозяйственная техника состоит из многочисленных узлов, включающих в себя большое количество металлических и полимерных деталей. Выход из строя таких деталей приводит к неработоспособности узлов и простою машины. Существующие технологии ремонта утративших работоспособность деталей специализируются на изделиях из металла. Полимерные элементы конструкций восстановлению не подлежат и требуют замены. Данную проблему способно решить штучное производство таких деталей на местах с применением аддитивных технологий.

Цель исследования. Оценить эффективность аддитивного производства при ремонте сельскохозяйственной техники в агропромышленном комплексе.

Материалы и методы. Проводилась исследовательская работа на базе лаборатории проектирования и быстрого прототипирования «Рапид-Про» Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета. Выполнялся ремонт электрического линейного привода подбарабана зерноуборочного комбайна John Deere методом 3D-печати. По предлагаемой методике проанализирована экономическая эффективность применения аддитивных технологий для производства деталей, утративших работоспособность при ремонте техники.

Результаты исследования. На основании проведенных работ была оценена эффективность восстановления полимерных элементов: стоимость ремонта линейного привода ниже стоимости новой детали. Традиционная технология изготовления в ремонте привода по сравнению с новой деталью дешевле в 7,6 раз, а аддитивная – в 23 раза.

Обсуждение и заключение. Сравнительная оценка экономической целесообразности ремонта традиционными и аддитивными технологиями показала, что при изготовлении детали на 3D-принтере ее цена в 3 раза меньше, чем при использовании фрезерования. Обработка резанием обходится дороже, так как требует дополнительной оснастки и определенного спектра оборудования. Применение аддитивного производства существенно снижает стоимость ремонта и значительно сокращает убытки от простоя техники. Современные аддитивные технологии обладают значительным потенциалом и могут широко использоваться в ремонтном производстве.

© Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмьяшкин Е. А., 2025

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

Ключевые слова: 3D-печать, традиционная технология, полимер, аддитивная технология, литье

Благодарности: авторы выражают признательность сторонним участникам, которые внесли определенный вклад в исследование.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмьяшкин Е.А. Технико-экономическое обоснование применения аддитивных технологий при восстановлении сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):770–785. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>

Feasibility Study of Additive Technologies Application in Restoring Agricultural Machinery

P. V. Senin, M. N. Chatkin, E. A. Kilmyashkin 

*National Research Mordovia State University,
Saransk, Russian Federation*

 40252@mail.ru

Abstract

Introduction. The complex design of modern agricultural machinery consists of numerous units having a large number of metal and polymer parts. Failure of these parts often leads to inoperability of the units and, as a rule, machine downtime. Existing technologies for repairing failed parts are based on the use of metal parts, while polymer structural parts cannot be restored and must be replaced. This problem can be solved through piece production of parts on-site using additive technologies.

Aim of the Study. The study is aimed at evaluating the efficiency of additive manufacturing in repairing agricultural machinery in the agro-industrial complex to reduce the time and cost of services.

Materials and Methods. The study was carried out on the basis of the Design and Rapid Prototyping laboratory of the Institute of Mechanics and Power Energy of the National Research Mordovia State University. The electric linear concave drive of the John Deer combine harvester was repaired using 3D-printing. According to the proposed methodology, there has been analyzed the economic efficiency of using additive technologies to produce failed parts during the repair of machinery.

Results. Based on the work carried out, the cost efficiency of restoring polymer elements was assessed. The cost of repairing a linear drive is lower than the cost of a new one. The traditional manufacturing technology used for repairing the drive is 7.6 times cheaper than buying the new part, and the additive technology is 23 times cheaper.

Discussion and Conclusion. A comparative assessment of the economic feasibility of repairing with the use of traditional and additive technologies has shown that the price of manufacturing a part on a 3D-printer is three times cheaper than when milling. Machining is more expensive because it requires additional equipment of a certain range. The use of additive technologies for manufacturing significantly reduces the repair cost and losses from equipment downtime. The study has shown that modern additive technologies have significant potential and can be widely used for repairing agricultural machinery.

Keywords: 3D-printing, traditional technology, polymer, additive technology, casting

Acknowledgments: The authors would like to acknowledge the third-party participants who contributed to the study.

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

For citation: Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Feasibility Study of Additive Technologies Application in Restoring Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):770–785. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>

ВВЕДЕНИЕ

Частыми причинами отказа сельскохозяйственных машин являются заводской брак, неправильная эксплуатация, несвоевременное и некачественное техническое обслуживание и т. д. Особенно неблагоприятная ситуация складывается при внезапном выходе машин из строя. Таким образом, проблема восстановления работоспособности машин является актуальной.

Простой машины при внезапном отказе приводит к существенным материальным потерям в хозяйстве, поэтому сроки ремонта должны быть минимальны. Если имеются в наличии запасные части, которые могут заменить вышедшие из строя, то время ремонта сокращается. Однако в современных реалиях это не всегда так – запасные части приобретаются у сторонних поставщиков, у которых они не всегда есть в наличии, что приводит к увеличению сроков закупки. В некоторых случаях прибегают к оперативному ремонту или изготовлению новых деталей, используя свою или стороннюю ремонтную базу. Это целесообразно в случае простоты деталей, несложности их геометрии. Иначе стоимость запчастей, изготавливаемых по традиционным технологиям, оказывается высокой, а время работ – длительным.

Традиционные технологии подразумевают процесс изготовления будущей детали методом литья,ковки,штамповки,металлообработки и т. д. Насыщенность ремонтных предприятий металлообрабатывающим оборудованием позволяет решать многие стандартные задачи. Однако при возникновении потребности в производстве изделий сложной геометрической формы с высокими требованиями к точности, могут возникнуть трудности – потребуется дорогостоящее оборудование с широкой номенклатурой, а также высококвалифицированные специалисты для ее обслуживания. Не все мелкие ремонтные предприятия способны решать такие задачи, так как в основном они не имеют большого потока эксклюзивных заказов, что делает нецелесообразным глубокую модернизацию производства.

Решение части нестандартных задач видится в использовании инновационных технологий цифрового производства. С их помощью создаются трехмерные объекты методом послойного наращивания. Здесь в качестве материала детали используется мелкодисперсный порошок, листовый материал, для изготовления которых применяются различные металлы и полимеры. В качестве оборудования используется 3D-принтер. На основании данных CAD-модели происходит распределение материала на поверхности, где посредством различных технологий спекания или расплавления он принимает форму будущей детали.

Применение аддитивных технологий существенно расширяет спектр решаемых задач в производстве, поскольку отсутствуют ограничения в форме и точности производимых изделий, необходимость содержать большой парк станочного оборудования и специалистов, работающих на нем. Стоимость производства напрямую зависит от технологии 3D-печати: печать металлами дорогостоящая, в то время как печать с применением полимерных материалов имеет невысокую стоимость. В связи с этим принтеры, использующие технологии печати полимерными материалами, способны решать многие задачи в ремонтном производстве и при этом быть доступными даже для небольших предприятий.

В статье проведен анализ аддитивных технологий, основанных на применении полимерных материалов как наиболее доступных на сегодняшний день.

Целью исследования является анализ эффективности применения аддитивных технологий для восстановления изношенных или поврежденных деталей сельхозмашин.

Задачи исследования:

- 1) оценить последствия простоя сельскохозяйственной техники при внеплановом ремонте;
- 2) изучить номенклатуру полимерных деталей, входящих в состав современной техники;
- 3) проанализировать существующие технологии производства неметаллических изделий с оценкой их стоимости и возможности применения в ремонтном производстве;
- 4) провести сравнительный анализ технологий традиционного и аддитивного производства;
- 5) оценить целесообразность применения аддитивных технологий в ремонте сельскохозяйственной техники.

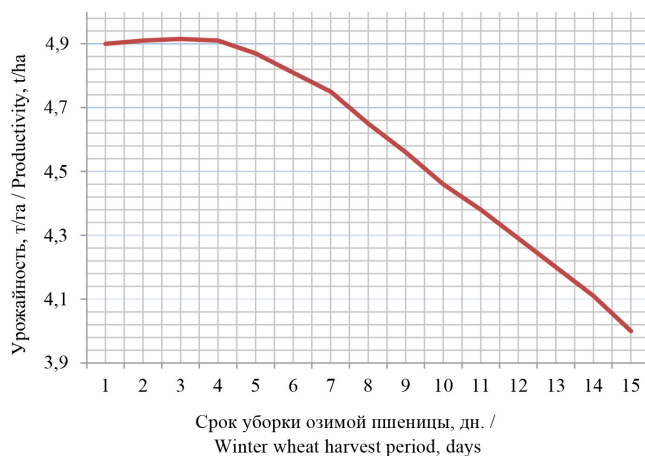
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При возникновении отказов техники главной задачей является введение ее в эксплуатацию в кратчайшие сроки. При этом необходимо подойти к решению возникшей проблемы, руководствуясь различными факторами: стоимостью ремонта, сроками его проведения и др. Отсутствие вышедшей из строя детали на складе предприятия приводит к необходимости заказа новой детали или ее восстановления. Время ожидания новой детали может составлять от нескольких дней до нескольких месяцев, если это техника зарубежного производителя. Однако даже высокая стоимость новой детали становится незначительной причиной по отношению к убыткам, которые несет предприятие от простоя неисправной техники. Примером такого положения может быть выход из строя комбайна для уборки зерновых. При возделывании зерновых культур очень важным фактором урожайности является своевременная уборка. Чем позже производится сбор урожая, тем ниже урожайность (рис. 1) [1]. Чем дольше комбайн простаивает в период уборки, тем больше потери зерновых. Такая тенденция прослеживается не только при выполнении уборочных работ, но и на фермах – несвоевременное кормление крупнорогатого скота уменьшает удои до 5 %¹.

Решение проблемы восстановления работоспособности техники видится в ремонте изношенных ремонтпригодных деталей, что в некоторых случаях должно сократить сроки простоя. Как показывает практика, ремонтные детали для потребителя по стоимости практически в два раза дешевле новых [2–4]. При этом ремонтная продукция не утрачивает своих свойств. Однако, проанализировав востребованности рынком ремонтных деталей, можно заключить, что

¹ Федоренко В.Ф., Голубев И.Г. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники. М.: ФГБНУ «Росинформагротех»; 2018. 140 с.

при восстановлении работоспособности машин используется свыше 80 % новых деталей [5–7] (табл.), поэтому проблемы сокращения простоя и снижения стоимости ремонта не решены.



Р и с. 1. Зависимость урожайности озимой пшеницы от срока уборки
F i g. 1. Dependence of winter wheat yield on harvesting time

Источник: составлено по материалам [1].
Source: compiled from the materials [1].

Т а б л и ц а
T a b l e

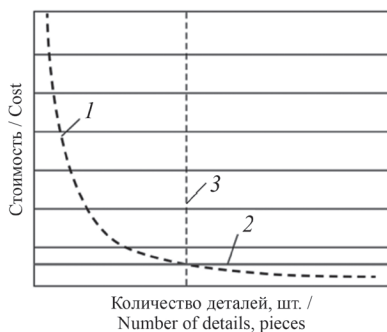
Уровень использования новых и восстановленных деталей при ремонте
The level of using new and restored parts during repairs

Название агрегата / Name of the unit	Детали всех категорий на агрегат / Details of all categories for the unit		Число деталей нагруженных, дефицитных, дорогостоящих на агрегат, ед. / Number of parts loaded, scarce, expensive per unit, units	Из них на агрегат, % / Of which per unit, %			
	Среднее число, ед. / Average number, unit	Среднее число наименований, ед. / Average number of items, unit		Восстановленных / Restored	Годных / Good enough	Покупных / Purchased	Бракованных / Defective
Трактора / Tractors	7 850	2 400	1 900	3	35	54	3,0
Автомобили / Cars	6 200	2 050	1 200	7	5	37	2,5
Комбайны / Combine har- vester	5 100	2 050	1 200	1	38	52	3,0
Сельскохозяйственные аг- регаты / Agricultural units	350	160	170	5	39	53	3,0

Отдельного внимания заслуживает группа деталей в конструкциях современной сельскохозяйственной техники, изготовленная из полимерных материалов². Содержание пластика уже достигло среднего уровня около 15 % от собственной массы машины [8–10]. Разнообразие деталей из пластмасс в составе современных машин очень велико, что, в свою очередь, приводит к более 5 % их поломок из общего количества отказов [11]. В большинстве случаев такие детали не являются ремонтпригодными и требуют замены. Детали из пластика могут закупаться отдельно, но ввиду низкой стоимости продавцы отказываются поставлять их в единичном количестве. В сложившейся ситуации приходится закупать не одну деталь, а всю партию или приобретать полностью узел, в который входит деталь.

Производство изделий из пластмасс основано на применении различных традиционных технологий, таких как литье под давлением, прессование, экструзия, пневмоформование, свободное литье, механическая обработка и др. Все эти технологии, как правило, не распространены на ремонтных предприятиях по причине нерентабельности производства из-за высокой стоимости оборудования и оснастки, а также отсутствия серийности производства [12–14], что делает невозможным изготовление таких деталей на местах. Решение данной проблемы видится в применении аддитивных технологий.

Количество изделий, произведенных с применением аддитивных технологий, не имеет четкой зависимости от конечной стоимости. На графике точка рентабельности находится на пересечении кривых (рис. 2) [15].



Р и с. 2. Цена изделия в зависимости от применяемой технологии:

1 – традиционная технология; 2 – аддитивная технология;

3 – рентабельность аддитивного производства

F i g. 2. The price of the product depends on the technology used:

1 – traditional technology; 2 – additive technology; 3 – profitability of additive manufacturing

Источник: составлено по материалам [15].

Source: compiled from the materials [15].

Проанализировав график, можно заключить, что и традиционные и аддитивные технологии могут дополнять друг друга в ремонтном производстве. Использование традиционных методов производства целесообразно при изготовлении изделий

² Дорохов А.С., Свиридов А.С. Перспективы применения полимеров в деталях сельскохозяйственных машин. В: Сборник материалов II междунар. науч.-практ. конф. «Горячкинские чтения», посвящ. 150-летию д-ра академика В. П. Горячкина (18 апреля 2018 г., г. Москва). М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева; 2019. С. 273–277. <https://www.elibrary.ru/xpncde>

большими партиями, тогда как аддитивные технологии более рентабельны при штучном производстве [16; 17].

Проблема реновации вышедшей из строя техники остается актуальной: простой техники во время ремонта нарушает технологический процесс производства и приводит к убыткам сельскохозяйственного производителя. В связи с этим существует необходимость в разработке и внедрении новых нетрадиционных технологий производства и ремонта [18; 19].

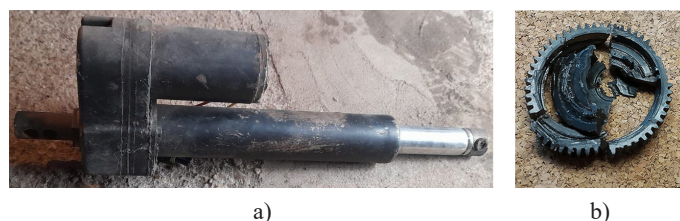
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В настоящее время в направлении развития аддитивных технологий прослеживается определенная тенденция, появляются различные консалтинговые организации, предлагающие услуги в области аддитивного производства, что позволяет сельхозпроизводителям с небольшими ремонтными базами не приобретать дополнительное оборудование. Такие услуги можно получить на стороне, например в лаборатории проектирования и быстрого прототипирования «Рapid-Про» на базе Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета. Основная задача лаборатории – разработка и реализация полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати и вакуумного литья в силиконовые формы.

Для оценки возможности и целесообразности использования в ремонте сельскохозяйственной техники аддитивных технологий проведена исследовательская работа.

Первым этапом работы был выбор объекта для ремонта. Оснащение лаборатории 3D-принтерами позволяет производить печать по SLS и FDM-технологиям, т. е. полимерными материалами. Требования к объекту: частота выхода из строя, возможность применения доступных нам аддитивных технологий, ремонтпригодность, стоимость и др. Выбор пал на электрический линейный привод подбарабана зерноуборочного комбайна John Deer (рис. 3). Поломка данного узла препятствует дальнейшей эксплуатации машины, поэтому необходимо в кратчайшие сроки произвести ремонт привода или заменить его новым.



Р и с. 3. Объект исследования:

- a) электрический линейный привод подбарабана зерноуборочного комбайна;
b) разрушенное зубчатое колесо привода

F i g. 3. The study object:

- a) electric linear drive of the grain harvester concave; b) broken drive gear

Источник: фотографии сделаны Е. А. Кильмашкиным при дефектовке узла в ООО «Магма ХД» (раб. пос. Чамзинка, Республика Мордовия, 2023 г.).

Source: photographs are taken by the author E. A. Kilmyashkin during the defect identification of a unit at “Magma HD” (workers’ settlement Chamzinka, Republic of Mordovia, 2023).

Проведен сравнительный анализ стоимости ремонта с применением аддитивных и традиционных технологий.

Методы и процедура исследования

Потребители при закупке запасных частей ориентируются прежде всего на невысокую стоимость и короткий срок изготовления. Однако часто деталь получается приобрести быстрее за более высокую цену.

Существуют различные методики оценки экономической эффективности применения аддитивных технологий для производства деталей утративших работоспособность при ремонте техники³.

Алгоритм принятия решений:

- 1) пригодность аддитивных технологий в реализации производства определенных запасных частей;
- 2) определение технологии аддитивного производства, позволяющей получить детали требуемого качества в сравнении с деталями, произведенными традиционным способом;
- 3) оценка рынка услуг аддитивного производства и выбор конкретного изготовителя;
- 4) определение затрат, связанных с простоем вышедшей из строя техники с учетом логистики и времени доставки деталей произведенных с применением аддитивных технологий или традиционным способом;
- 5) сравнение стоимости деталей, произведенных с помощью традиционных технологий и аддитивных.

Выполнение условий подтверждает рентабельность использования аддитивных технологий:

$$З_{\text{ПАТ}} < З_{\text{РТ}},$$

где $З_{\text{ПАТ}}$ – общие затраты, включающие в себя расходы на ремонтные работы по замене детали, изготовленной с применением технологии аддитивного производства (АТ); $З_{\text{РТ}}$ – общие затраты, включающие в себя расходы на ремонтные работы по замене детали, изготовленной традиционным методом (Т).

$$З_{\text{ПАТ}} = C_{\text{АТ}} + D_{\text{АТ}(t)} t_{\text{ДАТ}} + \Pi_{(t)}(t_{\text{ПАТ}} + t_{\text{ИАТ}} + t_{\text{ДАТ}}) + P;$$

$$З_{\text{РТ}} = C_{\text{Т}} + D_{\text{Т}(t)} t_{\text{ДТ}} + \Pi_{(t)}(t_{\text{РТ}} + t_{\text{ИТ}} + t_{\text{ДТ}}) + P,$$

где $C_{\text{АТ}}$, $C_{\text{Т}}$ – рыночная стоимость; $D_{\text{АТ}(t)}$, $D_{\text{Т}(t)}$ – логистические расходы по времени; $\Pi_{(t)}$ – упущенная прибыль от простоя; $t_{\text{ПАТ}}$, $t_{\text{РТ}}$ – время, необходимое для ремонта; $t_{\text{ИАТ}}$, $t_{\text{ИТ}}$ – требуемое время на изготовление; $t_{\text{ДАТ}}$, $t_{\text{ДТ}}$ – требуемое время на логистику; P – расходы на замену детали.

В случае невозможности приобретения новой детали отдельно ввиду ее реализации исключительно в составе узла и, как следствие, высокой стоимости, целесообразно рассмотреть альтернативные варианты, включая использование деталей, произведенных с применением аддитивных технологий. Данные технологии

³ Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Коберник Н.В., Филимонов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учеб. пособие для вузов. М.: Юрайт; 2024. 145 с.

позволяют изготавливать изделия по индивидуальному заказу в единичном или мелкосерийном производстве. При этом, если сроки поставки новых деталей невелики, то решение о закупке запасных частей, произведенных с применением аддитивных технологий, будет зависеть от выполнения следующего условия:

$$C_{\text{ТС}} > C_{\text{АТ}},$$

где $C_{\text{ТС}}$ – стоимость узла, в состав которого входит Т-деталь.

В случае производства деталей с помощью традиционных технологий существенно увеличивается как время изготовления, так и сроки простоя техники. Тогда $\Pi_{(i)}$ имеет большое значение, а возможность использования аддитивных технологий будет связана с выполнением неравенства:

$$t_{\text{ПТ}} > t_{\text{ПАТ}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ПАТ}}$, $t_{\text{ПТ}}$ – время на поставку запчастей.

$$t_{\text{ПАТ}} = t_{\text{ИАТ}} + t_{\text{ДАТ}} \text{ и } t_{\text{ПТ}} = t_{\text{ИТ}} + t_{\text{ДТ}}.$$

При выполнении условия (1) получим: $t_{\text{ИТ}} < t_{\text{ИАТ}}$ и $t_{\text{ДТ}} > t_{\text{ДАТ}}$. Из этих соотношений можно заключить, что в большинстве случаев на производство с применением аддитивных технологий требуется меньше времени, чем при использовании традиционных методов, особенно для изготовления малых серий. В то же время удаленность крупных предприятий от сельхозпроизводителей существенно увеличивает сроки поставок, а неразвитая логистическая сеть еще больше усугубляет проблему.

Выполнение неравенства (1) доказывает, что убытки из-за простоя в связи с большими сроками поставки деталей, произведенных традиционными технологиями, оказываются настолько значительными, что затраты на закупку деталей, изготовленных с применением аддитивных технологий, становятся незначительными, так как сроки изготовления и поставки уменьшаются, следовательно, уменьшается и простой техники.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Часто причиной выхода из строя электрического линейного привода подбарабана зерноуборочного комбайна John Deere является поломка редуктора, срез зубьев и разрушение зубчатых колес. Редукторы приводов в зависимости от производителя имеют в своем составе полимерные детали. Зубчатые колеса и шестерни к такому рода механизмам в продаже не найти. Цена нового изделия у поставщиков начинается от 73 тыс. руб. (без учета расходов по монтажу узла на комбайн и его простоя).

Произвести ремонт узла можно с помощью традиционной технологии резания или с применением 3D-печати. Материалом колес зубчатой передачи является нейлон. Имеющиеся в лаборатории 3D-принтеры позволяют работать с данным материалом.

Общая стоимость ремонта узла:

$$C = C_{\text{М}} + A + \text{ЗП} + C_{\text{ЭЛ}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{М}}$ – стоимость материалов, руб.; A – амортизационные отчисления, руб.; ЗП – заработная плата рабочих с отчислениями на страховые взносы, руб.; $C_{\text{ЭЛ}}$ – расходы на электроэнергию, руб.

Расчет стоимости ремонта традиционным способом

Существует два способа изготовления пластикового зубчатого колеса – литье и резание. Первый способ предположительно не применим в условиях небольшого ремонтного производства, поскольку требует специальной оснастки. Поэтому будем рассматривать технологию резанием модульными фрезами с помощью фрезерного обрабатывающего центра.

Одной из составляющих заработной платы является тарифная ставка оператора станка, установленная в размере 650 руб./ч. Примерное время производства зубчатого колеса – четыре часа. Без дополнительных отчислений заработная плата на изготовление зубчатого колеса оператора составит:

$$ЗП_0 = 4 \cdot 650 = 2\,600 \text{ руб.}$$

Отчисления на страховые взносы:

$$H_{CB} = \frac{H_{CO} \cdot ЗП_0}{100} = \frac{30 \cdot 2\,600}{100} = 780 \text{ руб.,}$$

где $H_{CO} = 30\%$ – страховых отчислений в Российской Федерации.

Суммарные расходы на заработную плату:

$$ЗП = H_{CB} + ЗП_0 = 780 + 2\,600 = 3\,380 \text{ руб.}$$

Под стоимостью материалов подразумевается как совокупная стоимость инструмента с оснасткой, так и стоимость расходных материалов. В нашем случае расходным материалом является нейлон стоимостью 75 руб. Заготовка и инструмент имеют стоимость 5 700 руб.:

$$C_M = 5\,700 + 75 = 5\,775 \text{ руб.}$$

Отчисления на амортизацию используемого в производстве оборудования рассчитываются из стоимости одного часа работы:

$$A_q = \frac{C_{\text{пер.}}}{t_{\text{см}} n_{\text{см}} \cdot T_{\text{исп}}} = \frac{750\,000}{8 \cdot 250 \cdot 10} = 37,5 \text{ руб. / ч,}$$

где $C_{\text{пер.}} = 750\,000$ руб. – балансная цена фрезерного станка; $T_{\text{исп}} = 10$ лет – предполагаемый срок использования оборудования; $t_{\text{см}} = 8$ ч – продолжительность рабочей смены; $n_{\text{см}} = 250$ шт. – число смен в году.

Стоимость электроэнергии, израсходованной за время изготовления колеса:

$$C_{\text{эл}} = T_{\text{эл}} \cdot t_{\text{тех}} \cdot W = 10,7 \cdot 4 \cdot 0,5 = 21,4 \text{ руб.,}$$

где $T_{\text{эл}} = 10,7$ руб./кВт · ч – стоимость кВт · ч.; $t_{\text{тех}} = 4$ ч – суммарное время, затраченное на изготовление зубчатого колеса; $W = 0,5$ кВт/ч – усредненное значение потребляющей мощности станком (MonoFab SRM-20).

Суммарные отчисления на амортизацию оборудования при изготовлении детали:

$$A = t_{\text{тех}} \cdot A_q = 4 \cdot 37,5 = 150 \text{ руб.}$$

Использование фрезерного станка с числовым программным управлением, требует учета текущих расходов на подготовку САМ-файла конструктором, средняя часовая оплата которого составляет 490 руб./ч, примерное время создание файла – 2 ч. Далее по формуле (2) определим общие расходы производственного процесса:

$$C = 150 + 5\,775 + 21,4 + 2\,600 + 490 \cdot 2 = 9\,526,4 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости ремонта методом печати на 3D-принтере

Для изготовления зубчатого колеса необходима услуга конструктора, почасовая оплата которого приведена выше. В рассматриваемом случае разрабатываемая им цифровая модель детали одинаково подходит для обеих технологий изготовления. Величина оплаты оператора 3D-принтера – 370 руб./ч. Примерное время печати детали – 2 ч. Время напрямую зависит от размера и требуемого качества распечатки детали, подготовительных операций, последующей постобработки. Затраты на зарплату без страховых взносов:

$$ЗП_0 = 490 \cdot 2 + 370 \cdot 2,5 \text{ ч} = 1\,905 \text{ руб.}$$

Страховые взносы составят:

$$Н_{св} = \frac{1905 \cdot 30}{100} = 571,5 \text{ руб.}$$

Совокупные расходы на заработную плату:

$$ЗП = 571,5 + 1\,905 = 2\,476,5 \text{ руб.}$$

В стоимость материалов не входят дополнительные расходы на инструмент и оснастку. Предполагаемый вес зубчатого колеса составит 140 г. Средняя стоимость нейлонового филамента для 3D-печати – 3 576 руб./кг:

$$C_M = 3\,576 \cdot 0,14 = 500,64 \text{ руб.}$$

Амортизационные начисления, приходящиеся на один час работы указанного 3D-принтера:

$$A_q = \frac{C_{\text{перв.}}}{T_{\text{исп.}} \cdot t_{\text{см}} \cdot n_{\text{см}}} = \frac{597\,000}{10 \cdot 8 \cdot 250} = 29,85 \text{ руб. / ч,}$$

где $C_{\text{перв.}} = 597\,000$ руб. – балансовая цена 3D-принтера.

Тогда амортизационные отчисления на изготовление шестерни составят:

$$A = t_{\text{ТЕХ}} \cdot A_q = 3 \cdot 29,85 = 89,55 \text{ руб.,}$$

где $t_{\text{тех}} = 3$ ч – суммарное время, затраченное на изготовление зубчатого колеса.

Стоимость израсходованной электрической энергии составит

$$C_{\text{эл}} = T_{\text{эл}} \cdot t_{\text{тех}} \cdot W = 10,7 \cdot 3 \cdot 0,6 = 19,26 \text{ руб.,}$$

$W = 0,6$ кВт/ч – усредненное значение потребляющей мощности принтером (принята мощность 3D-принтер Raise Pro2 Plus).

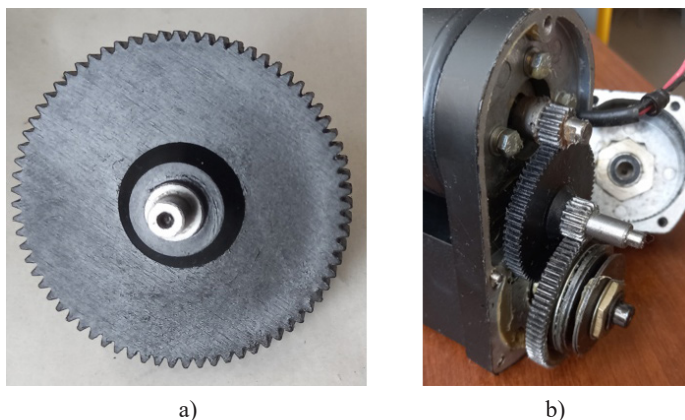
Следовательно, по формуле (2) находим общий объем затрат на изготовление шестерни с помощью 3D-печати из нейлона:

$$C = 19,26 + 89,55 + 500,64 + 2\,476,5 = 3\,085,95 \text{ руб.}$$

Целесообразность ремонта

Сопоставив полученные данные по стоимости ремонта линейного привода, можно заключить, что расходы выше при применении традиционной технологии, по сравнению с аддитивной. При этом расходы на ремонт традиционным методом и технологией 3D-печати меньше покупки новой детали в среднем в 7,6 и в 23 раза соответственно. В данном случае обе технологии ремонта целесообразны. Однако при восстановлении узлов, в состав которых входят детали сложной геометрической формы, применение традиционных технологий значительно дороже, поскольку требуется совершение дополнительных операций по обработке и дополнительное оборудование. Например, фрезерным станком невозможно изготовить шпоночный паз в ступице зубчатого колеса. Применение аддитивных технологий таких ограничений не имеет.

Проведя работы по восстановлению линейного электрического привода, спроектировали и распечатали на 3D-FDM-принтере зубчатое колесо с последующей запрессовкой металлической оси в ступицу и сборкой узла (рис. 4). Для печати использовался черный нейлоновый филамент диаметром 1,75 мм.



Р и с. 4. Восстановленный привод:
а) зубчатое колесо, произведенное методом 3D-печати; б) редуктор привода в сборе

F i g. 4. Restored drive:
a) gear wheel produced using 3D printing; b) a drive gearbox assembly

Источник: фотографии сделаны Е. А. Кильяшкиным при испытаниях метода аддитивного производства в лаборатории проектирования и быстрого прототипирования «Рapid Про» (2024 г.).

Source: photographs are taken by the author E. A. Kilmyashkin during testing of the additive manufacturing method in the design and rapid prototyping laboratory “Rapid Pro” (2024).

Полимерные детали в конструкциях современной техники не подлежат ремонту и, как правило, требуют замены на новые. Однако, если они входят в состав узлов, то зачастую не могут быть заменены ввиду отсутствия их в продаже у поставщиков, что приводит к покупке узла целиком. Таким образом, существенно увеличивается стоимость ремонта машины. Время ожидания поставок новых деталей может быть существенным.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами статьи проведена сравнительная оценка экономической целесообразности ремонта традиционными и аддитивными методами. Результаты исследования показали, что использование аддитивных технологий значительно сокращает финансовые расходы на производство. Это связано с отсутствием потребности в специальной оснастке, необходимой на каждый вид деталей, режущего инструмента, а также его систематической заточки. Применение такой технологии сокращает время производства, особенно при широкой номенклатуре выпускаемых изделий.

Аддитивные технологии с применением полимерных материалов получили довольно широкое распространение благодаря своей низкой себестоимости. Совершенствование технологии позволяет охватывать все большую номенклатуру полимеров и получать изделия с различными требуемыми характеристиками. Такая технология 3D-печати становится пригодна не только для создания прототипов, но и функциональных изделий.

Организаций, предлагающих услуги аддитивного производства, становится больше и, как правило, они стараются локализоваться ближе к потребителям, в том числе предприятиям сельхозпроизводства, что упрощает логистическую составляющую. Оборудование, которым сейчас располагает аддитивное производство, имеет возможность распечатывать объекты больших размеров, что позволяет производить широкий спектр востребованных деталей. Таким образом, можно однозначно утверждать, что современные аддитивные технологии имеют право на существование и должны широко использоваться в ремонтном производстве.

Исследование, проведенное в данной статье, носит важный характер в вопросе реновации техники в агропромышленном комплексе. Оно помогает определять эффективность подходов в ремонте машин и целесообразность применяемых методов производства изделий из пластика, на примере технологий аддитивного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова Ю.А., Денисов В.А. Анализ отказов полимерных деталей сельскохозяйственной техники. *Технический сервис машин*. 2021;3:146–154. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
2. Некраш М.Ю. Учет потерь от unplanned отказов кормоуборочной техники. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2004;(76):48–54. <https://www.elibrary.ru/thypgd>
3. Конкин М.Ю. Утилизация как завершающая стадия жизненного цикла машины. *Международный научный журнал*. 2011;(5):107–110. URL: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (дата обращения: 15.02.2025).
4. Лесконог Ю.А. Обоснование утилизации сельскохозяйственной техники. *Международный научный журнал*. 2011;(5):115–118. URL: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (дата обращения: 15.02.2025).
5. Игнатов В.И., Герасимов В.С., Мишина З.Н., Богатова Н.О. Пути совершенствования инженерной системы АПК по техническому обслуживанию сельскохозяйственной техники. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2018;(3):67–70 <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/67-70>
6. Корнейчук Н.И., Лялякин В.П. Перспективы использования промышленных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями

- в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса. *Труды ГОСНИТИ*. 2018;130:254–264. URL: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (дата обращения: 17.02.2025).
7. Никитченко С.Л., Воронов Е.В. Причинные факторы снижения эксплуатационной надежности сельскохозяйственной техники. *Вестник НГИЭИ*. 2020;(2):56–65. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825 (дата обращения: 17.02.2025).
 8. Izmailov A.Yu., Moskovskiy M.N., Podlesniy D.S. Development of a Set of Working Units From Polymeric Materials for the Design of Combine Harvesters. In: MATEC Web of Conferences. 2018. Article no. 05010. URL: <https://clck.ru/3QHrFY> (дата обращения: 20.02.2025).
 9. Лунин А.С. Полимерные композиционные материалы группы Полипластик в современном автомобилестроении: история и развитие. *Пластические массы*. 2011;(8):28–38. <https://www.elibrary.ru/ogabjj>
 10. Петров Р.И. О мировом опыте организации национальных систем авторециклинга. *Рециклинг отходов*. 2008;(5):2–11.
 11. Журавлев С.Ю. Совершенствование методов и технологий технического сервиса сельскохозяйственной техники. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2025;(3):72–80. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-245-3-72-80>
 12. Нефёлов И.С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2018;(11):15–17. <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
 13. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): a Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;(143):172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
 14. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: the Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5):677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
 15. Katkar R.A., Taft R.M., Grant G.T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing). *Dental Clinics of North America*. 2018;62(3):393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
 16. Namiki M., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y.R. Matsuzaki 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Plastic. In: Proceedings of the Society of the Advancement of Material and Process Engineering. Seattle; 2014. P. 6. URL: https://www.researchgate.net/publication/286005621_3D_printing_of_continuous_fiber_reinforced_plastic (дата обращения: 17.02.2025).
 17. Голубев И.Г., Спицин И.А., Быков В.В., Голубев М.И. Перспективы применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники. *Труды ГОСНИТИ*. 2018;130:214–219. URL: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (дата обращения: 17.02.2025).
 18. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(4):584–596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
 19. Овчинников В.А., Кильмяшкин Е.А., Князьков А.С., Овчинникова А.В., Жалнин Н.А., Зыкин Е.С. Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(2):222–234. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

REFERENCES

1. Goncharova Yu.A., Denisov V.A. Failures of Polymer Parts of Agricultural Machinery. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2021;3:146–154. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
2. Nekrash M.Yu. [Accounting for Losses from Unplanned Failures of Forage Harvesting Equipment]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2004;(76):48–54. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/thypgd>
3. Konkina M.Yu. Disposing as Final Phase of Machine Life Cycle. *International Scientific Journal*. 2011;(5):107–110. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (accessed 15.02.2025).

4. Leskonog Yu.A. Grounds for Farm Machinery Disposal. *International Scientific Journal*. 2011;(5):115–118. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (accessed 15.02.2025).
5. Ignatov V.I., Gerasimov V.S., Mishina Z.N., Bogatova N.O. Ways to Improve of the Agricultural Complex Engineering System for Agricultural Machinery Maintenance. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2018;(3):67–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/67-70>
6. Korneychuk N.I., Lyalyakin V.P. Prospects for the Use of Industrial Methods of Repairing Worn Machine Parts Electroplating and Polymer Coating in Modern Conditions of Development of Agro-industrial Technical Services. *Proceedings of Gosniti*. 2018;130:254–264. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (accessed 17.02.2025).
7. Nikitchenko S.L., Voronov E.V. Causal Factors of Reduction of Operational Reliability of Agricultural Machinery. *Bulletin NGIEI*. 2020;(2):56–65. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825 (accessed 17.02.2025).
8. Izmailov A.Yu., Moskovskiy M.N., Podlesniy D.S. Development of a Set of Working Units From Polymeric Materials for the Design of Combine Harvesters. In: MATEC Web of Conferences. 2018. Article no. 05010. Available at: <https://clck.ru/3QHrFY> (accessed 20.02.2025).
9. Lunin A.S. [The Use of Polymer Composite Materials produced by the company “Polyplastic” in Modern Automotive Engineering: History and Development]. *Plasticheskie massy*. 2011;(8):28–38. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/ogabjj>
10. Petrov R.L. [On the World Experience in Organization of Vehicle Recycling National Systems]. *Retsikling otkhodov*. 2008;(5):2–11. (In Russ.).
11. Zhuravlev S.Yu. Improving of Methods and Technologies of Technical Service of Agricultural Machinery. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2025;(3):72–80. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-245-3-72-80>
12. Nefyolov I.S. Renewal of Worn-Out Parts of Machines with Application of Additional Repair Parts Made by Additive Technology Methods. *Repair, Reconditioning, Modernization*. 2018;(11):15–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
13. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): a Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;(143):172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
14. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: the Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5):677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
15. Katkar R.A., Taft R.M., Grant G.T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing). *Dental Clinics of North America*. 2018;62(3):393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
16. Namiki M., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y.R. Matsuzaki 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Plastic. In: *Proceedings of the Society of the Advancement of Material and Process Engineering*. Seattle; 2014. P. 6. Available at: https://www.researchgate.net/publication/286005621_3D_printing_of_continuous_fiber_reinforced_plastic (accessed 17.02.2025).
17. Golubev I.G., Spitsyn I.A., Bykov V.V., Golubev M.I. Prospects of Application of Additive Technologies in the Repair of Agricultural Machinery. *Proceedings of Gosniti*. 2018;130:254–264. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (accessed 17.02.2025).
18. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584–596. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
19. Ovchinnikov V.A., Kilmyashkin E.A., Knyazkov A.S., Ovchinnikova A.V., Zhalnin N.A., Zykin E.S. Development of an Adaptive Centrifugal Working Element for Applying Mineral Fertilizers Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

Об авторах:

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

Чаткин Михаил Николаевич, доктор технических наук, 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>, SPIN-код: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

Кильмашкин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: [CAF-9821-2022](https://orcid.org/0000-0002-4827-8277), SPIN-код: 6497-0730, 40252@mail.ru

Вклад авторов:

П. В. Сенин – постановка задач исследования, общее руководство.

М. Н. Чаткин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 14.05.2025; поступила после рецензирования 04.08.2025;
принята к публикации 14.08.2025*

About the authors:

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

Mikhail N. Chatkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Prof. 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>, SPIN-code: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

Evgeny A. Kilmyashkin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of Prof. 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/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: [CAF-9821-2022](https://orcid.org/0000-0002-4827-8277), SPIN-code: 6497-0730, 40252@mail.ru

Authors contribution:

P. V. Senin – formulating the study objectives, overall management of the study process.

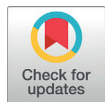
M. N. Chatkin – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the study ideas, goals and objectives

E. A. Kilmyashkin – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 14.05.2025; revised 04.08.2025; accepted 14.08.2025

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ / INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.786-807>

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

УДК / UDK 53:519.7

Original article / Оригинальная статья

Численное исследование влияния направления вдува каплеь на поглощение частиц пыли

А. Л. Тукмаков, Д. А. Тукмаков 

Федеральный исследовательский центр

«Казанский научный центр Российской академии наук»,

г. Казань, Россия

 tukmakovda@imm.knc.ru

Аннотация

Введение. Одной из наиболее эффективных технологий очистки газа от дисперсных примесей является жидкостная очистка, обусловленная неспособностью инерционных сепараторов улавливать мелкодисперсные частицы. В связи с этим возникает проблема повышения эффективности очистки газодисперсных сред указанным способом. Одним из направлений решения данной задачи является определение угла вдува каплеьных фракций, при котором процесс коагуляции будет наиболее результативным.

Цель исследования. Изучение влияния направления вдува струи каплеьных фракций на интенсивность процесса поглощения твердодисперсных частиц каплями жидкости.

Материалы и методы. Для описания течения многофазной среды применялась континуальная методика моделирования динамики неоднородных сред, в которой предполагалось решение полной гидродинамической системы уравнений движения для каждой из компонент смеси. Дисперсная фаза моделировалась как многофракционная полидисперсная, где фракции отличались плотностью материала и размером дисперсных включений. Учитывался межфазный теплообмен и обмен импульсом, включавший в себя силу аэродинамического сопротивления, динамическую силу Архимеда и силу присоединенных масс. Динамика несущей среды описывалась системой уравнений Навье – Стокса для вязкого, сжимаемого теплопроводного газа. Математическая модель учитывала столкновительную коагуляцию частиц различных фракций. Система уравнений математической модели дополнялась граничными условиями. Для интегрирования уравнений применялся явный конечно-разностный метод, для преодоления численных осцилляций – схема нелинейной коррекции.

Результаты исследования. Смоделирован вдув каплеьных фракций в поток запыленной под разными углами к стенке канала. Наиболее интенсивное убывание средней плотности пылевой фракции наблюдается для угла $\varphi = \pi/2$. Для углов вдува газокapлеьного потока φ и $\pi - \varphi$ близки распределения объемных содержаний пылевой фракции. Для широкого диапазона размера каплеьных фракций наибольшая величина скоростного скольжения наблюдается при вдуве каплеьного потока перпендикулярно направлению потока запыленной среды.

© Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А., 2025



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

Обсуждение и заключение. Выявленные закономерности позволяют определить направление вдува капельных фракций, при котором происходит наиболее интенсивное поглощение твердодисперсных частиц. Полученные результаты представляют практическую ценность для задач оптимизации технологий жидкостной очистки газодисперсных сред. Установлено, что угол вдува может существенно повысить интенсивность коагуляции дисперсных включений различных фракций. В перспективе полученные данные могут быть использованы для увеличения эффективности работы газожидкостных фильтров.

Ключевые слова: промышленная экология, жидкостная очистка дисперсных сред, численное моделирование, коагуляция, многофазная среда, полидисперсная газовзвесь

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», 2025 г.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния направления вдува капель на поглощение частиц пыли. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):786–807. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.786-807>

Numerical Study of the Influence of Droplet Injection Direction on Dust Particle Absorption

A. L. Tukmakov, D. A. Tukmakov 

Federal State Budgetary Institution of Science

“Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”

Kazan, Russia

 tukmakovda@imm.knc.ru

Abstract

Introduction. One of the most effective technologies for removing dispersed impurities from gas is liquid purification, because inertial separators cannot capture fine particles. The challenge arises of increasing the efficiency of gas-dispersed media purification using this method. One way to solve this challenge is determining the injection angle of the droplet fractions at which the coagulation process will be most effective.

Aim of the Study. The aim of the academic work was to study the effect of the injection direction of the droplet fraction jet on the intensity of the absorption of solid particles by liquid droplets.

Materials and Methods. To describe the flow of a multiphase medium, there was used a continual approach for modeling the dynamics of inhomogeneous media, which involves solving a complete hydrodynamic system of motion equations for each mixture components. The dispersed phase was modeled as a multifractional polydisperse one; the dispersed phase fractions may differ in both the material density and the size of dispersed particles. There were taken into account interphase heat exchange and momentum exchange including the aerodynamic drag force, the dynamic Archimedes force, and the added mass force. The dynamics of the carrier medium was described by the Navier–Stokes system of equations for a viscous, compressible heat-conducting gas. The mathematical model also took into account the collisional coagulation of particles of different fractions. The system of the mathematical model equations was supplemented with boundary conditions. An explicit finite-difference method was used to integrate the equations of the mathematical model. A nonlinear correction scheme was used to overcome numerical oscillations.

Results. There was simulated the injection of droplet fractions into a dust-laden flow at various angles to the channel wall. It has been found that the most intense decrease in the average density of the dust fraction is observed for an angle of $\varphi = \pi/2$. For gas-droplet flow injection angles of φ and $\pi - \varphi$, the distributions of the volumetric contents of the dust fraction are similar. The calculations have shown that for a wide range of droplet fraction sizes the highest velocity slip is observed for droplet injection perpendicular to the direction of dust-laden flow.

Discussion and Conclusion. The identified patterns allow us to determine the injection direction of droplet fractions that maximizes the absorption of solid particles. The results can be used to optimize liquid purification technologies for gas-dispersed media. In the future, these results can be used to improve the efficiency of gas-liquid filters.

Keywords: industrial ecology, liquid purification of dispersed media, numerical simulation, coagulation, multiphase medium, polydisperse gas suspension

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2025.

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

For citation: Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Numerical Study of the Influence of Droplet Injection Direction on Dust Particle Absorption. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):786–807. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.786-807>

ВВЕДЕНИЕ

В существующих исследованиях процессов жидкостной очистки запыленных сред наблюдается пренебрежение свойствами сжимаемости несущей среды или учетом эффектов взаимодействия несущей среды и дисперсной фазы. Также при теоретическом изучении динамики коагулирующих дисперсных включений для упрощения модели процессы коагуляции могут рассматриваться отдельно от газодинамических. Новизна работы заключается в учете взаимообратных эффектов взаимодействия дисперсных включений и несущей среды при моделировании вдува капельных потоков в запыленную среду под различными углами к стенке канала. Актуальность исследования связана с тем, что выявление закономерностей параметра вдува капельных фракций на интенсивность коагуляции позволит оптимизировать технологии жидкостной очистки газодисперсных сред.

Целью работы является исследование влияния угла вдува газокапельных фракций – φ в диапазоне $\pi/6 \leq \varphi \leq 5\pi/6$ на интенсивность коагуляции газокапельных фракций и пылевой фракции.

В рамках реализации цели предполагается проведение вычислительных экспериментов, в которых вдув капельных фракций в поток запыленной среды проводится под разными углами.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Различные промышленные технологии часто связаны с течениями неоднородных сред [1–3]. Неоднородные среды могут быть смесями различных газов или многофазными течениями, в которых компоненты смеси отличаются агрегатным состоянием. Теоретической основой для динамики неоднородных сред, моделирования многофазных течений служат фундаментальные исследования в этой области¹. Разработаны континуальные методики описания таких систем, а также

¹ Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука; 1978. 336 с.

расчетные методы моделирования многофазных газожидкостных сред². Проблемы математического моделирования ударно-волновых процессов в многофазных средах нашли отражение в ряде научных школ. Так, Новосибирские ученые рассмотрели теоретические аспекты и получили физические параметры ударных волн в газовзвесах³. Одномерные математические модели ударно-волновой динамики запыленных, газочапельных и порошковых сред, разработанные А. Г. Кутушевым, а также ударно-волновые и детонационные течения металлических частиц в газе, исследованные А. В., Федоровым, В. М. Фоминым, Т. А. Хмель представляют комплексный подход к изучению многофазных сред⁴. А. Ю. Вараксин провел обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований потоков неоднородных газодисперсных сред, в частности, направленных на изучение взаимодействия газа и дисперсных частиц, где автор отмечает преимущество континуальных моделей при моделировании дисперсных потоков с большим объемным содержанием дисперсных частиц [2]. М. А. Пахомовым, В. И. Тереховым на основе численных методов проанализирован процесс распространения дисперсной примеси в трубе, а также рассмотрен теплообмен между фазами смеси [3]. С помощью физического моделирования исследовано влияние вдува на параметры течения газа с твердыми частицами и на скоростные параметры частиц различных размеров, предложено практическое применение выявленных физических закономерностей для защиты поверхностей от дисперсных потоков твердых частиц [4]. В рамках численного моделирования исследовано течение смеси газа и твердых частиц в канале с проницаемыми стенками и описаны процессы, происходящие в камере сгорания твердотопливного ракетного двигателя [5].

Проблемы математического моделирования эффективности скрубберов были рассмотрены в исследованиях, в которых предложен ряд методов повышения эффективности устройств [6]. В работе зарубежных ученых экспериментально изучено влияние коагуляции и седиментации на процесс очистки аэрозолей, образующихся при выбросе продуктов работы атомных электростанций в атмосферу [7]. В свою очередь А. А. Шрайбер, И. В. Фединчик и М. В. Протасов разработали модель динамики полидисперсной газовзвеси в скруббере Вентури с использованием физических упрощений в предположении одномерной геометрии и стационарного характера течения [8]. Учеными из Уральского горного университета были проведены исследования закономерностей динамики вращающихся капель жидкости, по результатам которых разработана математическая модель их циркуляционного движения в газовой среде [9]. На основе уравнения Буссинеска построена математическая модель движения пылевых частиц в аппарате жидкостной очистки, также разработаны критерии подобия физических экспериментов и процессов в реальных условиях шахт [10]. Результаты исследования влияния гидродинамических взаимодействий на скорость коагуляции частиц представлены в трудах авторов

² Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат; 1981. 472 с.

³ Киселев С.П., Руев Г.А., Трунев А.П., Фомин В.М., Шавалеев М.Ш. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах. Новосибирск: Наука; 1992. 261с.

⁴ Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. Санкт-Петербург: Недра; 2003. 284 с.; Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газовзвесах частиц металлов. Новосибирск: Параллель; 2015. 301 с.

из США [11]. В расчетах предполагалась сферическая форма дисперсных включений. Процесс коагуляционного столкновения двух капель криогенной жидкости при низких температурах, а также двух капель воды при комнатных температурах при различных числах Рейнольдса и параметров удара был описан учеными из Китая, однако их математическая модель пренебрегала сжимаемостью среды [12]. В настоящее время разработана математическая модель потока многофазной среды при наличии процессов нуклеации, коагуляции и фазовых переходов, где для описания первого используется модель гомогенной нуклеации [13].

Математически смоделирован процесс жидкостной очистки запыленной среды в трубе Вентури, где за счет воздействия ультразвука происходит интенсификация процесса коагуляции, однако не учитывается воздействие дисперсной фазы на динамику несущей среды [14]. М. В. Тимофеева представила математическую модель процесса коагуляции капель нескольких фракций, отличающихся размером в технологии аэроохладительного охлаждения без расчетов и моделирования газодинамических процессов несущей среды [15].

Китайскими учеными исследованы процессы столкновения и коагуляции дисперсных частиц, смоделированы процессы коагуляция капель воды, взвешенных в атмосфере [16]. Исследователи из Южной Африки провели расчеты рабочих режимов скруббера методами вычислительной гидродинамики; несущая среда описывалась ими полной гидродинамической системой уравнений, а для описания параметров дисперсной фазы решались обыкновенные дифференциальные уравнения относительно временной переменной с учетом параметров воздействия на дисперсные частицы со стороны несущей среды. Так, пренебрегались эффекты взаимного воздействия компонент смеси [17].

Австрийскими учеными разработана математическая модель расчетных соотношений процессов массопереноса в скрубберах, используемых в химической промышленности, без учета гидродинамических процессов [18].

Исследователи из Индии привели обзор публикаций, посвященных проблемам работы скрубберов, и проанализировали влияние различных гидродинамических параметров на эффективность работы этих устройств, отмечая важность вычислительной гидродинамики для оптимизации работы этих аппаратов [19].

В публикациях, посвященных динамике газозвесей, исследуются различные вопросы, связанные с практическими приложениями. В частности, интерес к исследованию коагулирующих частиц связан с промышленной энергетикой и аэрокосмической техникой⁵. Актуальность исследования динамики коагуляции дисперсных сред обусловлена повышением производительности оборудования для очистки запыленных сред от дисперсных включений.

Анализ литературы демонстрирует, что при моделировании течений многофазных сред исследователи часто пренебрегают либо сжимаемостью несущей среды, либо межфазным взаимодействием. В ряде случаев течение описывается как стационарное течение с одномерной геометрией, при этом описание двухмерных эффектов важно при исследовании вдува капельных фракций поперек потока

⁵ Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Методы расчета. М.: ВИНТИ; 1971. 267 с.

запыленной среды. При моделировании процессов коагуляции в многофазных средах не учитывается межфазное взаимодействие или в целом рассматриваются процессы коагуляции без расчета газодинамических уравнений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На данный момент при описании неоднородных сред применяется несколько подходов: равновесный, предполагающий описание течения неоднородной среды как однородной с введением поправок на ее неоднородность⁶; диффузионный, наиболее подходящий для описания течений гомогенных смесей, имеющих одинаковое агрегатное состояние, например, смесей газов. В расчетах применялась компьютерная программа, реализующая численное решение для континуальной математической модели динамики многофазных сред. Дисперсная фаза предполагалась полидисперсной и многофракционной с учетом различных размеров дисперсных включений плотности и теплоемкости фракций дисперсной фазы [20]. Уравнения математической модели учитывали тепловое и скоростное взаимодействие фракций дисперсной фазы и несущей среды. Газовая фаза смеси описывалась системой уравнений Навье – Стокса с учетом теплообмена и обмена импульсом с фракциями дисперсной фазы [21–23]:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \left(\left(1 - \sum_{i=2}^n \alpha_i \right) \rho_1 \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\left(1 - \sum_{i=2}^n \alpha_i \right) \rho_1 u_1 \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\left(1 - \sum_{i=2}^n \alpha_i \right) \rho_1 v_1 \right)}{\partial y} = 0, \\
 & \frac{\partial (\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_1 u_1^2 + p - \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_1 u_1 v_1 - \tau_{xy})}{\partial y} = - \sum_{i=2,n} F_{xi} + \sum_{i=2,n} \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x}, \\
 & \frac{\partial (\rho_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_1 u_1 v_1 - \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_1 v_1^2 + p - \tau_{yy})}{\partial y} = - \sum_{i=2,n} F_{yi} + \sum_{i=2,n} \alpha_i \frac{\partial p}{\partial y}, \\
 & \frac{\partial (e_1)}{\partial t} + \frac{\partial \left([e_1 + p - \tau_{xx}] u_1 - \tau_{xy} v_1 - \lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left([e_1 + p - \tau_{yy}] v_1 - \tau_{xy} u_1 - \lambda \frac{\partial T_1}{\partial y} \right)}{\partial y} = \\
 & = \sum_{i=2,n} Q_i - \sum_{i=2,n} (|F_{xi}|(u_1 - u_i) - |F_{yi}|(v_1 - v_i)) + \sum_{i=2,n} \alpha_i \left(\frac{\partial (p u_i)}{\partial x} + \frac{\partial (p v_i)}{\partial y} \right), \quad (1) \\
 & \tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right), \\
 & \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \right), \quad D = \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y},
 \end{aligned}$$

где n – количество фракций, α_i – объемное содержание i -ой фракции; ρ_1 – средняя плотность газа, кг/м³; t – время, с; u_1, v_1 – декартовы составляющие скорости

⁶ Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука; 1978. 336 с.

несущей среды, м/с; x – продольная координата, м; y – поперечная координата, м; p – давление, Па; τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} – составляющие тензора вязких напряжений, Па; F_{xi} и F_{yi} – x и y составляющие межфазного обмена импульсом i -ой фракции, кг/(м²·с²); e_i – полная энергия несущей среды, Дж; λ – теплопроводность газа, Вт/(м·К); T_1 – температура несущей среды, К; Q_i – тепловой поток между i -ой фракцией и несущей средой, Дж/с; u_i – составляющая скорости i -ой фракции в x направлении м/с; v_i – составляющая скорости i -ой фракции в y направлении м/с; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; D – вспомогательная функция, с⁻¹.

В работе предполагалось, что плотность несущей среды ρ_1 определяется исходя из ее объемного содержания α_1 и физической плотности несущей среды ρ_{g0} : $\rho_1(x, y) = \alpha_1(x, y)\rho_{g0}$, ρ_{g0} – начальная физическая плотность газа, кг/м³.

Для моделирования динамики i -ой фракции дисперсной фазы применялась полная система уравнений динамики сплошной среды [24; 25]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i u_i v_i) &= F_{xi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i v_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i v_i^2) &= F_{yi} - \alpha_i \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial(e_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_i u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(e_i v_i) &= -Q_i, \\ \rho_i &= \alpha_i \rho_{i0}, \quad e_i = \rho_i C_{vi} T_i, \\ F_{xi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{d_i} C_d \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} (u_1 - u_i) + \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \\ &+ 0,5 \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right), \\ F_{yi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{d_i} C_d \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} (v_1 - v_i) + \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right) + \\ &+ 0,5 \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right), \\ C_{di} &= \frac{24}{Re_{i1}} + \frac{4}{Re_{i1}^{0,5}} + 0,4, \quad M_{i1} = \frac{|\bar{V}_1 - \bar{V}_i|}{c}, \\ Re_{i1} &= \frac{\rho_1 |\bar{V}_1 - \bar{V}_i| d_i}{\mu}, \quad Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$Nu_i = 2 \exp(-M_{il}) + 0,459 M_{il}^{0,55} Pr^{0,33},$$

$$Q_i = Q_i = \frac{6\alpha_i \lambda Nu_i (T_1 - T_i)}{d_i^2}, i = 2, \dots, n,$$

где ρ_i – средняя плотность i -ой фракции дисперсной фазы, кг/м³; e_i – тепловая энергия i -ой фракции дисперсной фазы, Дж; ρ_{i0} – физическая плотность i -ой фракции дисперсной фазы, кг/м³; C_{vi} – теплоемкость материала i -ой фракции дисперсной фазы, Дж/(кг·К); T_i – температура несущей среды дисперсной фазы, К; d_i – диаметр частицы i -ой фракции дисперсной фазы, м; C_{di} – коэффициент сопротивления i -ой фракции дисперсной фазы; Re_{il} – относительное число Рейнольдса i -ой фракции; M_{il} – относительное число Маха i -ой фракции дисперсной фазы; V_1 – вектор скорости несущей среды, м/с; V_i – вектор скорости i -ой фракции дисперсной фазы, м/с; c – скорость звука в м/с; Pr – число Прандтля; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); Nu_i – относительное число Нуссельта i -ой фракции дисперсной фазы.

Обмен импульсом i -ой фракции дисперсной и газовой фазы учитывал несколько различных сил: силу аэродинамического сопротивления F_{AD} , динамическую силу Архимеда F_{DA} , силу присоединенных масс F_{MA} в продольном и поперечном направлении соответственно x и y :

$$F_{ADxi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{d_i} C_d \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} (u_1 - u_i),$$

$$F_{DAxi} = \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right),$$

$$F_{AMxi} = 0,5 \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right),$$

$$F_{ADyi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_i}{d_i} C_d \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} (v_1 - v_i),$$

$$F_{DAyi} = \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right),$$

$$F_{AMyi} = 0,5 \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right),$$

где F_{ADxi} – x составляющая силы аэродинамического сопротивления i -ой фракции, кг/(м²·с²); F_{DAxi} – x составляющая динамической силы Архимеда i -ой фракции, кг/(м²·с²); F_{AMxi} – x составляющая силы присоединенных масс i -ой фракции, кг/(м²·с²); F_{ADyi} – y составляющая силы аэродинамического сопротивления i -ой фракции, кг/(м²·с²); F_{DAyi} – y составляющая динамической силы Архимеда i -ой фракции, кг/(м²·с²); F_{AMyi} – y составляющая силы присоединенных масс i -ой фракции, кг/(м²·с²).

Использовалась модель столкновительной коагуляции дисперсных включений, описанная В. Е. Алемасовым⁷ [20]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial m_i}{\partial t} &= \sum_{j=2}^{i-1} k_{ij} n_j m_j, \\ k_{ij} &= \frac{\pi}{4} (d_i + d_j)^2 \left[u_i \cos(\theta) + v_i \sin(\theta) - \sqrt{u_j^2 + v_j^2} \right], \quad \theta = \arctg \left(\frac{v_j}{u_j} \right), \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} &= -n_i \sum_{j=i+1}^n k_{ij} n_j, \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} &= \frac{1}{m_i} \sum_{j=2}^{i-1} k_{ij} (u_j - u_i) m_j n_j, \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} &= \frac{1}{m_i} \sum_{j=2}^{i-1} k_{ij} (v_j - v_i) m_j n_j, \\ T_{i*} &= \frac{1}{C_i m_{i*}} \left(\sum_{j=2}^{i-1} k_{ij} n_j C_j m_j T_j + C_i m_i T_i \right).\end{aligned}$$

где d – диаметр капли, м; m_i – масса частицы i -й фракции, кг; ρ_{i0} – средняя плотность фракции дисперсной фазы, кг; k_{ij} – константа коагуляции, $\text{м}^2 \cdot \text{с}$; n_j – концентрация, м^{-3} ; m_j – масса j -ой фракции, кг; d_j – диаметр капли j -ой фракции, м; u_j – x составляющая скорости j -ой фракции, м/с; v_j – y составляющая скорости j -ой фракции, м/с; n_i – концентрация частиц i -й фракции, м^{-3} ; T_{i*} – температура частицы i -й фракции после коагуляции, К; C_{i*} , C_j , C_i – теплоемкость i -й фракции, Дж/(кг·К); m_{i*} – масса i -ой фракции, кг; T_j – температура i -й фракции К.

Предполагается, что частицы i -й фракции поглощают все частицы меньших размеров, т. е. частицы фракций $j = 2 \dots i - 1$.

Системы уравнений динамики полидисперсной газовой смеси (1) – (2) интегрировались конечно-разностным методом Мак-Кормака второго порядка точности⁸.

Рассмотрим применение численного алгоритма явного метода Мак-Кормака на примере скалярного нелинейного уравнения в частных производных (3):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} + \frac{\partial a(f)}{\partial y} = c(f). \quad (3)$$

Алгоритм явного конечно-разностного метода Мак-Кормака для скалярного нелинейного уравнения (3) имеет вид (4)–(5):

$$f_{jk}^* = f_{jk}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j+1k}^n - a_{jk}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{jk+1}^n - b_{jk}^n) + \Delta t c_{j,k}^n, \quad (4)$$

$$f_{jk}^{n+1} = 0,5(f_{jk}^n + f_{jk}^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{jk}^* - a_{j-1k}^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{jk}^* - b_{jk-1}^*) + 0,5 \Delta t c_{j,k}^*, \quad (5)$$

где Δx , Δy – шаги по пространственному направлению, Δt – шаг по времени, $b_{j,k+1}^n$.

⁷ Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Методы расчета. М.: ВИНТИ; 1971. 267 с.

⁸ Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир; 1991. 551 с.

В явном методе Мак-Кормака в качестве условия устойчивости рассматривается условие устойчивости типа Куранта – Фридрихса – Леви⁹:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta h^2}{4v + (|u| + |v|)\Delta h}, \quad \Delta h = \min(\Delta x, \Delta y), \quad |u| = \max |u_i|, \quad |v| = \max |v_i|$$

Численные осцилляции преодолевались с помощью схемы нелинейной коррекции сеточной функции [26; 27]: если $(\delta \tilde{u}_{j-1/2} \cdot \delta \tilde{u}_{j+1/2}) < 0$ или $(\delta \tilde{u}_{j+1/2} \cdot \delta \tilde{u}_{j+3/2}) < 0$ $f_j = \tilde{f}_j + k(\delta u_{j+1/2} - \delta u_{j-1/2})$. Используются обозначения: $\delta \tilde{u}_{j-1/2} = \tilde{u}_j - \tilde{u}_{j-1}$, $\delta \tilde{u}_{j+1/2} = \tilde{u}_{j+1} - \tilde{u}_j$, $\delta \tilde{u}_{j+3/2} = \tilde{u}_{j+2} - \tilde{u}_{j+1}$, где \tilde{u}_j – значение функции после перехода на $(n+1)$ -ый временной слой по схеме Мак-Кормака, коэффициент коррекции – $k = 0,125$.

Сопоставление численной модели с результатами физического эксперимента дало приемлемое соответствие [25].

В данной работе численно моделируется динамика газозвесей в вязком сжимаемом теплопроводном газе.

Рассматривались углы вдува как по направлению течение пылевой фракции, так и случаи, когда потоки газокapельных фракцию втекают против потока пылевой фракции.

В численных расчетах задавались следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} u_1(t, 1, j) &= u_0, \quad u_2(t, 1, j) = u_0, \quad u_k(t, 1, j) = u_k(t, 2, j), \quad v_k(t, 1, j) = 0, \\ u_k(t, N_x, j) &= 0, \quad v_k(t, N_x, j) = v_k(t, N_x - 1, j), \\ u_k(t, i, N_y) &= 0, \quad v_k(t, i, N_y) = 0, \quad u_k(t, i, 1) = 0, \quad v_k(t, i, 1) = 0, \\ u_k(t, i, 1) &= 0, \quad v_2(t, i, 1) = v_2(t, i, 2), \quad v_k(t, i, 1) = v_0, \\ \rho_1(t, 1, j) &= \rho_1(t, 2, j), \quad \rho_2(t, 1, j) = \rho_{20} \alpha_{20}, \quad \rho_k(t, 1, j) = \rho_k(t, 2, j), \\ \rho_k(t, N_x, j) &= \rho_k(t, N_x - 1, j), \quad \rho_1(t, i, 1) = \rho_1(t, i, 2), \quad \rho_k(t, i, 1) = \rho_k(t, i, 2), \\ \rho_1(t, i, N_y) &= \rho_1(t, i, N_y - 1), \quad \rho_k(t, i, N_y) = \rho_k(t, i, N_y - 1), \\ e_1(t, 1, j) &= e_1(t, 2, j), \quad e_k(t, 1, j) = e_k(t, 2, j), \\ e_1(t, N_x, j) &= e_1(t, N_x - 1, j), \quad e_k(t, N_x, j) = e_k(t, N_x - 1, j), \\ e_1(t, i, 1) &= e_1(t, i, 2), \quad e_k(t, i, 1) = e_k(t, i, 2), \\ e_1(t, i, N_y) &= e_1(t, i, N_y - 1), \quad e_k(t, i, N_y) = e_k(t, i, N_y - 1), \\ p(t, 1, j) &= p(t, 2, j), \quad p(t, N_x, j) = p(t, N_x - 1, j), \quad p(t, i, 1) = p(t, i, 2), \\ p(t, i, N_y) &= p(t, i, N_y - 1), \end{aligned}$$

где u_0 – продольная скорость втекания запыленной среды в канал, м/с.

⁹ Там же.

Граничные условия на поверхности вдува описывают впрыск капельного потока под углом φ к стенке канала:

$$\begin{aligned} L_1 \leq i\Delta x \leq L_2 \\ \rho_1(t, i, 1) = \rho_1(t, i, 2), \quad \rho_2(t, i, 1) = \rho_2(t, i, 2), \quad \rho_k(t, i, 1) = \rho_{k0}, \\ u_1(t, i, 1) = v_0 \cos \varphi, \quad u_k(t, i, 1) = v_0 \cos \varphi, \quad v_1(t, i, 1) = v_0 \sin \varphi, \quad v_k(t, i, 1) = v_0 \sin \varphi, \\ v_2(t, i, 1) = v_2(t, i, 2), \quad p(t, i, 1) = p(t, i, 2), \end{aligned}$$

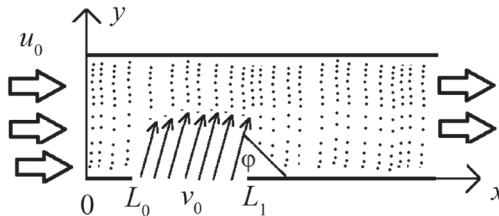
где v_0 – поперечная скорость втекания капельных фракций через поверхность вдува, м/с.

Количество узлов и их нумерация в x и y направлениях – $N_x = 200$, $N_y = 100$, i, j .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью определения влияние угла вдува капельных фракций на интенсивность коагуляции было проведено несколько вычислительных экспериментов по моделированию коагуляции пылевых частиц и капельных фракций с различными параметрами вдува капельных фракций.

На рисунке 1 схематично изображен моделируемый процесс вдува капельных фракций в поток запыленной среды. Газовая фаза смеси и пылевая фракция дисперсной фазы движутся в продольном направлении со скоростью $u_0 = 20$ м/с. Четыре капельных фракции с разными размерами капель вдуваются через боковую поверхность. Капельные фракции вдуваются со скоростью $v_0 = 4$ м/с под углом φ к поверхности канала. Параметры физической области: длина канала $L = 0,4$ м, ширина канала $h = 0,1$ м, $L_0 = 0,1$ м, $L_2 = 0,2$ м.



Р и с. 1. Общая схема моделируемого процесса
F i g. 1. General scheme of the simulated process

Источник: Рисунок 1 составлен авторами статьи.

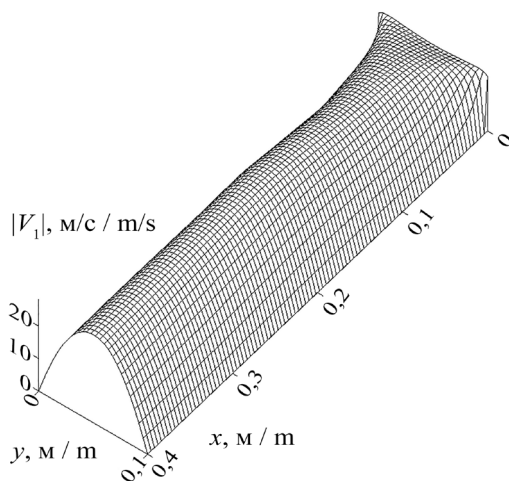
Source: figure 1 is compiled by the authors of the article.

Примечание: u_0 – продольная скорость газа и пылевой фракции, м/с; v_0 – продольная скорость поперечного вдува газа и капельных фракций, м/с; y – поперечная координата, м; x – продольная координата, м; L_0 – правая продольная координата поверхности вдува, м; L_1 – левая продольная координата поверхности вдува, м; φ – угол вдува, радианы.

Note: u_0 is the longitudinal velocity of gas and dust fraction; v_0 is the longitudinal velocity of transverse injection of gas and droplet fractions; y is the transverse coordinate; x is the longitudinal coordinate; L_0 is the right longitudinal coordinate of the injection surface; L_1 is the left longitudinal coordinate of the injection surface; φ is the injection angle.

Размеры ячеек вдоль продольной и поперечной координат соответственно $\Delta x = 0,002$, $\Delta y = 0,001$ м.

Численные расчеты вектора скорости несущей среды проводились в рамках решения системы уравнений Навье – Стокса с однородными граничными условиями Дирихле на стенках канала, для модуля скорости несущей среды $|V_1| = \sqrt{u_1^2 + v_1^2}$ (рис. 2) можно наблюдать «параболический» ламинарный профиль течения вязкой среды в канале, при котором максимальные значения модуля скорости несущей среды достигаются вблизи оси симметрии канала¹⁰.



Р и с. 2. Модуль скорости несущей среды
F i g. 2. Velocity modulus of the carrier medium

Источник: Рисунки 2, 3 составлены авторами статьи с помощью программы Surfer.
Source: Figures 2 and 3 are made by the authors of the article using the program Surfer.

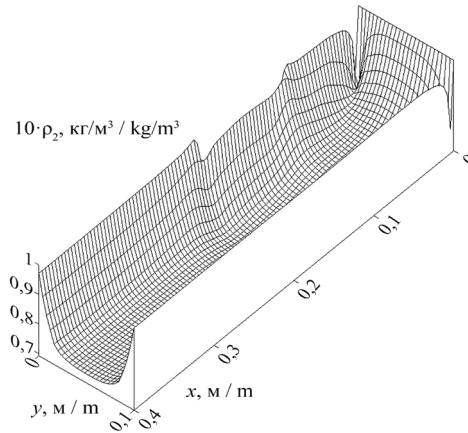
Примечание: $|V_1|$ – модуль скорости несущей среды, м/с; x – продольная координата, м; y – поперечная координата, м.

Note: $|V_1|$ is the velocity module of the carrier medium, м/с; x is the longitudinal coordinate, м; y is the transverse coordinate, м.

Пылевая фракция с размером частиц $d_1 = 2$ мкм имеет физическую плотность материала частиц – $\rho_{20} = 2\,500$ кг/м³, начальное объемное содержание – $\alpha_{20} = 0,00004$. Через боковую поверхность канала втекают четыре капельных фракции с размерами частиц $d_2 = 4$ мкм, $d_3 = 8$ мкм, $d_4 = 20$ мкм, $d_5 = 40$ мкм и плотностью материала капель – $\rho_{i0} = 1\,000$ кг/м³. Предполагалось, что у всех четырех капельных фракций вблизи поверхности вдува одинаковое постоянное объемное содержание – $\alpha_{i0} = 25 \cdot 10^{-6}$, $i = 3, \dots, 6$.

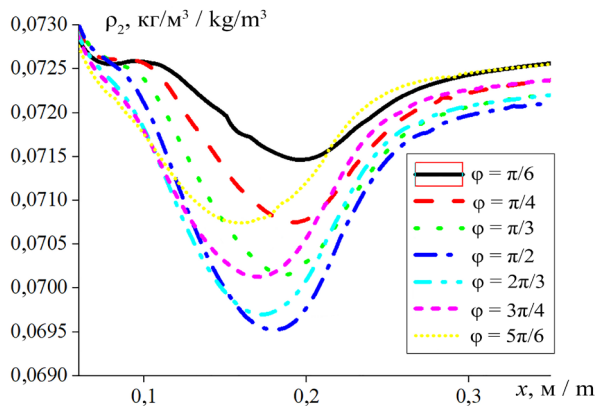
Численные расчеты демонстрируют, что в процессе движения многофракционной газозвеси в канале за счет коагуляции частиц происходит поглощение пылевой фракции капельными фракциями (рис. 3).

¹⁰ Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир;1991. 551 с.



Р и с. 3. Пространственное распределение средней плотности материала пылевой фракции
F i g. 3. Spatial distribution of the average density of the dust fraction material

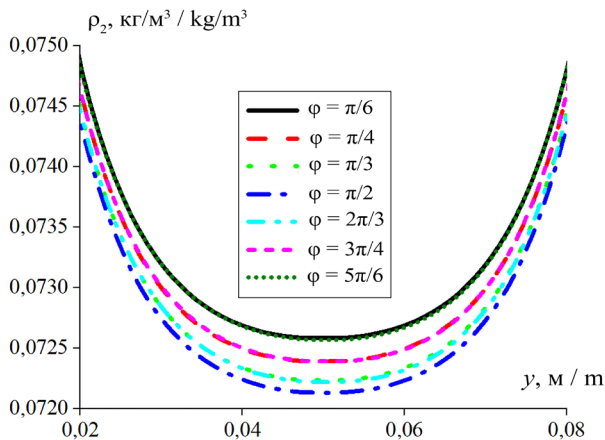
На рисунке 4 представлено пространственное распределение средней плотности пылевой фракции вдоль оси x ($y = h/2$), при различных углах вдува капельной фракции газозвеси в поперечном распределении пылевой фракции. Наименьшее значение средней плотности достигается когда угол вдува составляет $\varphi = \pi/2$: $\rho_2 = 0,0695$ кг/м³. Для углов $\varphi = \pi/6$ и $\varphi = 5\pi/6$ величины средней плотности составляют $\rho_2 = 0,0714$ кг/м³, $\rho_2 = 0,0708$ кг/м³ соответственно. Для углов $\varphi = \pi/4$ и $\varphi = 3\pi/4$ величины средней плотности составляют $\rho_2 = 0,0707$ кг/м³ и $\rho_2 = 0,0702$ кг/м³ соответственно. Для углов $\varphi = \pi/3$ и $\varphi = 5\pi/6$ величины средней плотности составляют $\rho_2 = 0,0701$ кг/м³ и $\rho_2 = 0,0696$ кг/м³ соответственно. При втекании капельных фракций против движения потока средняя плотность запыленной среды уменьшается более интенсивно.



Р и с. 4. Продольное распределение средней плотности материала пылевой фракции, в момент времени $t = 0,0031$ с
F i g. 4. Longitudinal distribution of the average density of the dust fraction material at $t = 0,0031$ s

Источник: графики для рисунков 2–10 построены авторами с помощью программы Origin 2022.
Source: The graphs for Figures 2–10 are compiled by the authors using the program Origin 2022.

На рисунке 5 показано распределение средней плотности пылевой фракции газовзвеси вдоль оси y ($x = L/2$) канала при различных углах втекания капельных фракций, наименьшее значение средней плотности пылевой фракции наблюдается вблизи оси симметрии канала. Минимальное значение средней плотности достигается для угла $\varphi = \pi/2$. Значение средней плотности для углов φ и $\pi - \varphi$ близки.



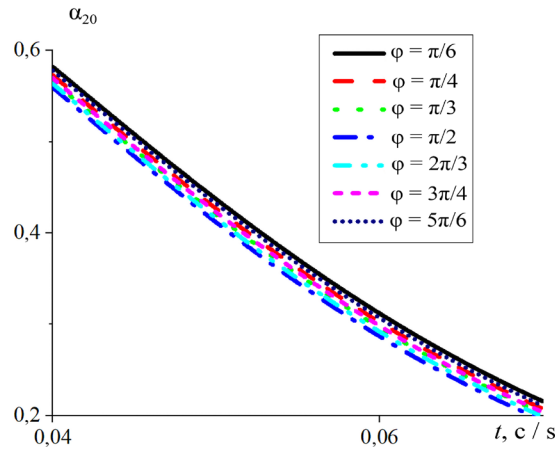
Р и с. 5. Поперечное распределение средней плотности материала пылевой фракции, момент времени $t = 0,0031$ с

F i g. 5. Transverse distribution of the average density of the dust fraction material, time $t = 0,0031$ s

На рисунке 6 представлен отрезок временной зависимости объемного содержания пылевой фракции в точке $x = L/2$, $y = h/2$. Наиболее интенсивно убывание объемного содержание пылевой фракции происходит, если угол между потоком пылевой фракции и втекающими капельными фракциями – $\varphi = \pi/2$, наименее интенсивно убывание происходит при втекании капельных фракций по направлению движения запыленного потока с углом – $\varphi = \pi/6$. В точке ($x = 0,5h$, $y = 0,5L$) $\varphi = \pi/6 - \alpha_2 = 0,21625\alpha_{20}$, $\varphi = \pi/4 - \alpha_2 = 0,2095\alpha_{20}$, $\varphi = \pi/3 - \alpha_2 = 0,2035\alpha_{20}$, $\varphi = \pi/2 - \alpha_2 = 0,2\alpha_{20}$, $\varphi = 2\pi/3 - \alpha_2 = 0,2175\alpha_{20}$, $\varphi = 3\pi/4 - \alpha_2 = 0,20475\alpha_{20}$, $\varphi = 5\pi/6 - \alpha_2 = 0,21125\alpha_{20}$ в момент времени $t = 0,07$ с. Интенсивность убывания объемного содержания пылевой фракции для углов φ и $\pi - \varphi$ близки, но для случая тупого угла интенсивность убывания больше.

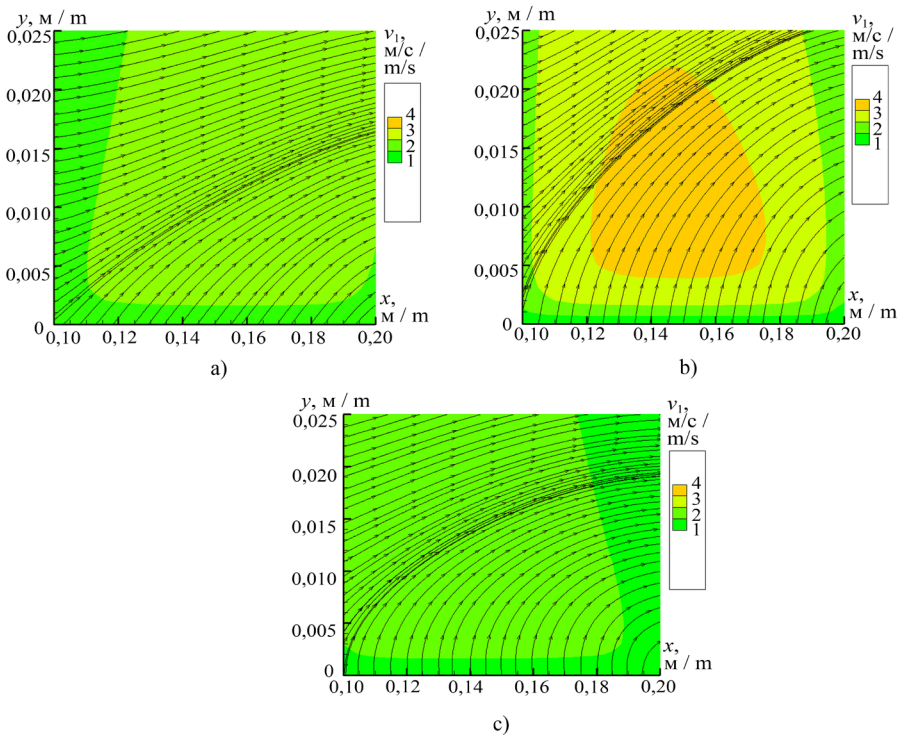
Результаты численных расчетов демонстрируют, что угол вдува газок капельной смеси – φ оказывает влияние на линии тока несущей среды. При остром угле вдува – $\varphi = \pi/6$ (рис. 7 а), линии тока направлены по потоку, разворота линий тока не наблюдается. При этом за счет разности скоростей вдуваемого и основного потока происходит уменьшение скорости движения всей смеси. При вдуве газа под углом – $\varphi = \pi/2$ (рис. 7 б) и тупым углом – $\varphi = 5\pi/6$ (рис. 7 с) наблюдаются отличия линий тока газа. Для тупого угла (рис. 7 с) наблюдается разворот линий тока газа, при этом происходит уменьшение скорости движения несущей среды, связанное с тем, что вдув происходит против движения основного потока. Для углов вдува $\varphi = \pi/6$, $\varphi = \pi/4$, $\varphi = \pi/3$, $\varphi = \pi/2$, $\varphi = 2\pi/3$, $\varphi = 3\pi/4$, $\varphi = 5\pi/6$ максимальные значения модуля скорости несущей среды – $\max|V_1|$ в поперечном сечении $x = L/2$,

момент времени $t = 0,0031$ с соответственно – $\max|V_1| = 25,5$ м/с, $\max|V_1| = 26,5$ м/с, $\max|V_1| = 27,3$ м/с, $\max|V_1| = 28,22$ м/с, $\max|V_1| = 27,93$ м/с, $\max|V_1| = 27,3$ м/с, $\max|V_1| = 26,5$ м/с соответственно.



Р и с. 6. Временная зависимость объемного содержания в точке $x = L/2, y = h/2$

F i g. 6. Time dependence of volume content at point $x = L/2, y = h/2$



Р и с. 7. Линии тока несущей среды при вдуве капельных фракций:

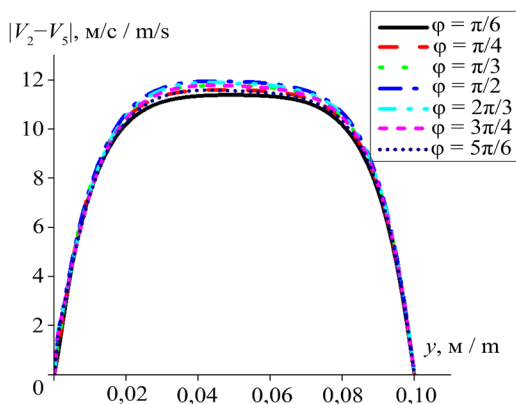
а) под углом $\varphi = \pi/6$; б) под углом $\varphi = \pi/2$; в) под углом $\varphi = 5\pi/6$

F i g. 7. Streamlines of the carrier medium during injection of droplet fractions:

а) at an angle $\varphi = \pi/6$; б) at an angle $\varphi = \pi/2$; в) at an angle $\varphi = 5\pi/6$

Максимальное значение модуля скорости несущей среды достигается для вдува капельных фракций поперек канала, угол вдува – $\varphi = \pi/2$.

Поперечные распределения модуля разности скоростей для пылевой фракции и капельной фракции с диаметром дисперсных включений $d_4 = 20$ мкм (рис. 8) демонстрирует, что наибольшее значение модуля разности скорости пылевой фракции и фракции частиц с дисперсностью $d = 20$ мкм достигается для угла вдува $\varphi = \pi/2$. При прочих углах втекания капельной фракции наблюдается меньшее значение скоростного скольжения.



Р и с. 8. Пространственное распределение вдоль оси y модуля разности скоростей фракций для различных углов вдува

F i g. 8. Spatial distribution along the y -axis of the difference in fraction velocities for different injection angles

В таблице представлены максимальные значения модуля разности скоростей пылевой фракции и капельных фракций для поперечного сечения при координате $x = 0,5L$ для разных углов втекания капельных фракций.

Т а б л и ц а

T a b l e

Влияние угла вдува капельных фракций на величину максимального скоростного скольжения пылевой фракции и различных капельных фракций

The influence of the injection angle of droplet fractions on the magnitude of the maximum velocity slip of the dust fraction and various droplet fractions

Угол вдува, φ / injection angle, φ	$\max V_3 - V_2 $, м/с при $d_2 = 4$ мкм / $\max V_3 - V_2 $, m/s at $d_2 = 4 \mu\text{m}$	$\max V_4 - V_2 $, м/с при $d_3 = 8$ мкм / $\max V_4 - V_2 $, m/s at $d_3 = 8 \mu\text{m}$	$\max V_5 - V_2 $, м/с при $d_4 = 20$ мкм / $\max V_5 - V_2 $, m/s at $d_4 = 20 \mu\text{m}$	$\max V_6 - V_2 $, м/с при $d_5 = 40$ мкм / $\max V_6 - V_2 $, m/s at $d_5 = 40 \mu\text{m}$
$\pi/6$	0,91	3,50	11,36	19,30
$\pi/4$	0,94	3,71	11,58	19,50
$\pi/3$	0,96	3,80	11,70	19,70
$\pi/2$	1,02	3,95	12,00	20,00
$2\pi/3$	0,97	3,85	11,88	19,85
$3\pi/4$	0,95	3,74	11,75	19,70
$5\pi/6$	0,92	3,55	11,50	19,50

Из таблицы следует, что наибольшее значение модуля разности скоростей пылевой фракции и капельных фракций различных размеров наблюдается для угла $\varphi = \pi/2$. Для углов $\pi - \varphi$ ($\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/3$), когда вдув осуществляется против потока запыленной среды, интенсивность скоростного скольжения пылевой фракции и капельных фракций имеет большее значение, чем для углов φ ($\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/3$), вдува по направлению движения запыленной среды.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена вопросам коагуляции многофракционной взвеси в потоке газа. Исследовалось влияние угла вдува капельных фракций на распределение средней плотности пылевой фракции. В отличие от известных в научной литературе результатов для описания процесса коагуляции применялась континуальная Эйлера математическая модель. Проведены расчеты для углов вдува потока меньших и больших $\pi/2$. Выявлено, что угол вдува капельных фракций оказывает влияние на интенсивность коагуляции дисперсных включений. Наиболее интенсивное убывание средней плотности пылевой фракции наблюдается для угла $\varphi = \pi/2$. Для углов вдува газокapельного потока φ и $\pi - \varphi$ распределения объемных содержаний пылевой фракции близки. Для вдува против потока $\varphi > \pi/2$ интенсивность убывания объемного содержания пылевой фракции имеет большее значение, чем при вдуве по направлению потока – $\varphi < \pi/2$. Закономерность можно объяснить тем, что для капельных фракций, имеющих размеры большие, чем размеры дисперсных включений пылевой фракции, наибольшее значение скоростного скольжения с пылевой фракцией достигается для угла – $\varphi = \pi/2$. Минимизация остаточной концентрации может быть достигнута выбором направления вдува капельных фракций и исключением в спектре размеров фракций с малым скоростным скольжением относительно пылевой фракции. При этом играет роль также и концентрация распыляемых фракций. Таким образом, задача оптимизации является многофакторной. В данном исследовании рассматривается только выбор направления дисперсного капельного потока, при котором наблюдается повышенная интенсивность коагуляции пылевой и капельных фракций. В расчетах выявлено, что для широкого диапазона размера капельных фракций наибольшая величина скоростного скольжения наблюдается для вдува капельного потока перпендикулярно направлению потока запыленной среды. Ограничением модели является то, что в исследовании не учитывалось влияние турбулентной вязкости на динамику несущей среды и фракций дисперсной фазы, что имело бы значение для скоростных газодисперсных потоков. Полученные результаты можно использовать при оптимизации аппаратов жидкостной очистки запыленных сред.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жалнин Р.В., Масыгин В.Ф., Пескова Е.Е., Тишкин В.Ф. Моделирование дозвуковых многокомпонентных реагирующих газовых потоков на неструктурированных сетках. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(1):162–175. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.162-175>

2. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор). *Теплофизика высоких температур*. 2020;58(4):646–669. <https://doi.org/10.31857/S004036442004016X>
3. Пахомов М.А., Терехов В.И. Распределение концентрации частиц в газокapельном ограниченном закрученном потоке. Эйлеров и Лагранжев подходы. *Теплофизика высоких температур*. 2020;58(6):896–900. <https://doi.org/10.31857/S0040364420060149>
4. Вараксин А.Ю., Протасов М.В. О влиянии вдува газа на защиту поверхностей тел, обтекаемых двухфазным потоком. *Теплофизика высоких температур*. 2017;55(6):785–788. <https://doi.org/10.7868/S0040364417060151>
5. Волков К.Н. Нестационарное турбулентное течение газовзвеси в канале при наличии вдува в условиях вынужденных колебаний давления. *Прикладная механика и техническая физика*. 2013;54(2):65–80. URL: <https://sibran.ru/journals/issue.php?ID=148528> (дата обращения: 15.02.2022).
6. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Математическая модель и теплогидравлические характеристики насадочных скрубберов конденсационного охлаждения газа. *Инженерно-физический журнал*. 2022;95(1):259–266. URL: http://www.itmo.by/publications/jepther/bibl/?ELEMENT_ID=20274 (дата обращения: 22.02.2022).
7. Wu L., Lei S., Wang Y., Yang S., Lin X., Wang H. A Highly Efficient Biomass Compound Aerosol Suppressant in Purifying Radioactive Cesium Droplet Aerosols. *Molecules*. 2022;27(19):6480. <https://doi.org/10.3390/molecules27196480>
8. Шрайбер А.А., Фединчик И.В., Протасов М.В. О влиянии турбулентности газового потока на эффективность улавливания частиц в скруббере Вентури. *Теплофизика высоких температур*. 2015;53(1):85–90. <https://doi.org/10.7868/S0040364414060143>
9. Макаров В.Н., Угольников А.В., Макаров Н.В., Боярских Г.А. Повышение эффективности пылеулавливания. *Горный журнал*. 2022;(8):62–70. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.08.09>
10. Косарев Н.П., Макаров В.Н., Угольников А.В., Макаров Н.В., Дылдин Г.П. Шахтная аэрология пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(4):155–165. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-155-165>
11. Suresh V., Liu Z., Perry Z., Gopalakrishnan R. Modeling Particle-Particle Binary Coagulation Rate Constants for Spherical Aerosol Particles at High Volume Fractions Using Langevin Dynamics Simulations. *Journal of Aerosol Science*. 2022;164:106001. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106001>
12. Zhou D., Liu X., Yang S., Hou Y., Zhong X. Collision Dynamics of Two Liquid Nitrogen Droplets Under a Low-Temperature Condition. *Cryogenics*. 2022;124:103478. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103478>
13. Amanbaev T.R., Tilleuov G.E., Zuparbekova A. Mathematical Modeling of Dispersed Media Flows in the Presence of Nucleation, Coagulation and Phase Transitions. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2021;102(2):14–24. <https://doi.org/10.31489/2021ph2/14-24>
14. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Доровских Р.С., Нестеров В.А., Голых Р.Н. Моделирование процесса мокрой очистки газов с наложением ультразвуковых полей. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2017;(4):57–63. URL: <http://s-sibsb.ru/issues/53-2017-issues/issue-20/258-13> (дата обращения: 20.02.2022).
15. Тимофеева М.В. Влияние коагуляции капель воды на их распределение по размерам в рабочей части аэроохлаждающей установки. *Журнал технической физики*. 2019;89(4):491–496. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.04.47301.11-18>
16. Wang L.P. Coagulation in Turbulent Particle-Laden Flows. *Modeling Approaches and Computational Methods for Particle-Laden Turbulent Flows*. 2023:111–145. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-390133-8.00012-8>
17. Lerrotholi L., Everson R.C., Hattingh B.B., Koech L., Roux I.L., Neomagus H.W.J.P. и др. Computational Fluid Dynamics Modeling and Analysis of Lime Slurry Drying in a Laboratory

- Spray Dry Scrubber. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024;63(48):21038–21061 URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.4c02014> (дата обращения: 20.02.2022).
18. Schlager M., Baumfrisch M., Haushofer G., Wolf-Zöllner V., Lehner M. Mass Transfer Model of Packed Seawater Scrubbers for Marine Exhaust Gas Cleaning. *Chemical Engineering Research and Design*. 2023;192:128–140. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.024>
 19. Avinasilingam M., Gopalsamy S. Studies on Venturi Scrubber Performance and Efficiency-A Review. *Journal of Advanced Mechanical Sciences*. 2022;1(1):14–20. URL: <http://research.jamsjournal.com/index.php/jamsjournal/article/view/5> (дата обращения: 25.02.2022).
 20. Тукмаков А.Л. Модель динамики дисперсных фракций во встречных потоках металлопорошка и полимера при образовании композитного материала. *Теплофизика высоких температур*. 2021;59(3):415–421. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020125>
 21. Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Динамика заряженной газозвеси с начальным пространственно неравномерным распределением средней плотности дисперсной фазы при переходе к равновесному состоянию. *Теплофизика высоких температур*. 2017;55(4):509–512. <https://doi.org/10.7868/S004036441703022X>
 22. Tukmakov D.A. Numerical Investigation of the Influence of Properties of the Gas Component of a Suspension of Solid Particles on the Spreading of a Compressed Gas-Suspension Volume in a Binary Medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020;93(2):291–297. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02120-9>
 23. Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния параметров дисперсных частиц на осаждение твердой фазы электрически заряженной полидисперсной газозвеси. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2022;22(1):90–102. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102>
 24. Tukmakov D.A. One-Dimensional Unsteady Numerical Model of Gas Suspension Flow Caused by Gravitational Sedimentation of Particles with a Constant Velocity. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022;63(7):1218–1226. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0021894422070148> (дата обращения: 25.02.2022).
 25. Tukmakov D.A. Numerical Simulation of Oscillations of Aerosol with a Low Dispersed Phase Concentration in a Closed Tube by the Continuum Mathematical Model. *Technical Physics*. 2022;67(2):764–770. <https://doi.org/10.1134/S1063784222110032>
 26. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа. *Математическое моделирование*. 1993;5(3):74–83. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=1962&option_lang=rus (дата обращения: 26.02.2022).
 27. Тукмаков А.Л. Возникновение синфазных колебаний тонких пластин при аэроупругом взаимодействии. *Прикладная механика и техническая физика*. 2003;44(1):77–82. URL: https://sibran.ru/journals/issue.php?ID=120006&ARTICLE_ID=121760 (дата обращения: 26.02.2022).

REFERENCES

1. Zhalnin R.V., Masyagin V.F., Peskova E.E., Tishkin V.F. Modeling the Flow of Multicomponent Reactive Gas on Unstructured Grids. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(1):162–175. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.162-175>
2. Varaksin A. Yu. [Two-Phase Flows with Solid Particles, Droplets, and Bubbles: Problems and Research Results (Review)]. *High Temperature*. 2020;58(4):646–669. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S004036442004016X>
3. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. [Particle Concentration Distribution in a Gas–Droplet Confined Swirling Flow: Euler and Lagrange Approaches]. *High Temperature*. 2020;58(6):896–900. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0040364420060149>
4. Varaksin A.Y., Protasov M.V. [The Effect of Gas Injection on the Protection of Body Surfaces Streamlined by a Two-Phase Flow]. *High Temperature*. 2017;55(6):785–788. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0040364417060151>

5. Volkov K.N. Unsteady Turbulent Flow of a Gas Suspension in a Channel Under Conditions of Injection And Forced Pressure Oscillations. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2013;54(2):65–80. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://sibran.ru/journals/issue.php?ID=148528> (accessed 15.02.2022).
6. Laptev A.G., Lapteva E.A. [Mathematical Model and Thermohydraulic Characteristics of Packed Scrubbers of Condensation Cooling of a Gas]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2022;95(1):259–266. (In Russ.) Available at: http://www.itmo.by/publications/jepther/bibl/?ELEMENT_ID=20274 (accessed 22.02.2022).
7. Wu L., Lei S., Wang Y., Yang S., Lin X., Wang H. A Highly Efficient Biomass Compound Aerosol Suppressant in Purifying Radioactive Cesium Droplet Aerosols. *Molecules*. 2022;27(19):6480 <https://doi.org/10.3390/molecules27196480>
8. Shraiber A.A., Fedinchik I.V., Protasov M.V. [On Effect of Gas Flow Turbulence on the Efficiency of Particle Collection In a Venturi Scrubber]. *High Temperature*. 2015;53(1):85–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0040364414060143>
9. Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V., Boyarskikh G.A. Dust Control Efficiency Improvement. *Gornyy Zhurnal*. 2022;(8):62–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.08.09>
10. Kosarev N.P., Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V., Dyldin G.P. Mine Aerology of Dust Aerosols Under Conditions of Hydro-Vortex Coagulation. *News of the Ural State Mining University*. 2020;(4):155–165. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-4-155-165>
11. Suresh V., Liu Z., Perry Z., Gopalakrishnan R. Modeling Particle-Particle Binary Coagulation Rate Constants for Spherical Aerosol Particles at High Volume Fractions Using Langevin Dynamics Simulations. *Journal of Aerosol Science*. 2022;164:106001. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106001>
12. Zhou D., Liu X., Yang S., Hou Y., Zhong X. Collision Dynamics of Two Liquid Nitrogen Droplets Under a Low-Temperature Condition. *Cryogenics*. 2022;124:103478 <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103478>
13. Amanbaev T.R., Tilleuov G.E., Zuparbekova A. Mathematical Modeling of Dispersed Media Flows in the Presence of Nucleation, Coagulation and Phase Transitions. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2021;102(2):14–24. <https://doi.org/10.31489/2021ph2/14-24>
14. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N. Modeling of the Process of Wet Gas Cleaning with the Imposition of Ultrasonic Fields. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2017;(4):57–63. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://s-sibsb.ru/issues/53-2017-issues/issue-20/258-13> (accessed 20.02.2022).
15. Timofeeva M.V. The Effect of Coagulation of Water Droplets on their Size Distribution In the Operating Part of an Air-Cooler Device. *Technical Physics*. 2019;89(4):491–496. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.04.47301.11-18>
16. Wang L.P. Coagulation in Turbulent Particle-Laden Flows. *Modeling Approaches and Computational Methods for Particle-Laden Turbulent Flows*. 2023:111–145. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-390133-8.00012-8>
17. Lerotholi L., Everson R.C., Hattingh B.B., Koech L., Roux I.L., Neomagus H.W.J.P., et al. Computational Fluid Dynamics Modeling and Analysis of Lime Slurry Drying in a Laboratory Spray Dry Scrubber. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024;63(48):21038–21061. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.4c02014> (accessed 20.02.2022).
18. Schlager M., Baumfrisch M., Haushofer G., Wolf-Zöllner V., Lehner M. Mass Transfer Model of Packed Seawater Scrubbers for Marine Exhaust Gas Cleaning. *Chemical Engineering Research and Design*. 2023;192:128–140. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.024>
19. Avinasilingam M., Gopalsamy S. Studies on Venturi Scrubber Performance and Efficiency-A Review. *Journal of Advanced Mechanical Sciences*. 2022;1(1):14–20. Available at: <http://research.jamsjournal.com/index.php/jamsjournal/article/view/5> (accessed 25.02.2022).

20. Tukmakov A.L. [Model of the Dynamics of Disperse Fractions in Counter Flows of a Metal Powder and Polymer in the Formation of a Composite Material]. *High temperature*. 2021;59(3):415–421. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0040364421020125>
21. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. [Dynamics of a Charged Gas Suspension with an Initial Spatially Nonuniform Distribution of the Average Dispersed Phase Density During the Transition to the Equilibrium State]. *High temperature*. 2017;55(4):509–512. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S004036441703022X>
22. Tukmakov D.A. Numerical Investigation of the Influence of Properties of the Gas Component of a Suspension of Solid Particles on the Spreading of a Compressed Gas-Suspension Volume in a Binary Medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020;93(2):291–297. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02120-9>
23. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A. Numerical Study of the Influence of the Parameters of Dispersed Particles on the Deposition of the Solid Phase of an Electrically Charged Polydisperse Gas Suspension. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2022;22(1):90–102. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-1-90-102>
24. Tukmakov D.A. One-Dimensional Unsteady Numerical Model of Gas Suspension Flow Caused by Gravitational Sedimentation of Particles with a Constant Velocity. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022;63(7):1218–1226. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0021894422070148> (accessed 25.02.2022).
25. Tukmakov D.A. Numerical Simulation of Oscillations of Aerosol with a Low Dispersed Phase Concentration in a Closed Tube by the Continuum Mathematical Model. *Technical Physics*. 2022;67(2):764–770. <https://doi.org/10.1134/S1063784222110032>
26. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. Application of Compact Difference Schemes to Investigation of Unstationary Gas Flows. *Matematicheskoe Modelirovanie*. 1993; 5(3):74–83. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=mm&paperid=1962&option_lang=rus (accessed 26.02.2022).
27. Tukmakov A.L. [Origination of in-Phase Oscillations of thin Plates with Aeroelastic Interaction]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2003;44(1):77–82. (In Russ.) Available at: https://sibran.ru/journals/issue.php?ID=120006&ARTICLE_ID=121760 (accessed 26.02.2022).

Об авторах

Тукмаков Алексей Львович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник института механики и машиностроения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», (420100, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8570-4140>, tukmakov@imm.knc.ru

Тукмаков Дмитрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник института механики и машиностроения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (420100, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>, Researcher ID: K-6563-2014, Scopus ID: 55776164300, SPIN-код: 3556-8576, tukmakovda@imm.knc.ru

Вклад авторов:

А. Л. Тукмаков – разработка или проектирование методологии исследований, создание моделей.

Д. А. Тукмаков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение сбора данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 27.12.2024; поступила после рецензирования 16.06.2025;
принята к публикации 11.08.2025

About the authors:

Aleksei L. Tukmakov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of Institute of Mechanics and Engineering, Federal State Budgetary Institution of Science “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences” (2 Lobachevsky St., Kazan 420100, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8570-4140>, tukmakov@imm.knc.ru

Dmitry A. Tukmakov, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher Fellow of Institute of Mechanics and Engineering, Federal State Budgetary Institution of Science “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences” (2 Lobachevsky St., Kazan 420100, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-8548>, Researcher ID: [K-6563-2014](#), Scopus ID: [55776164300](#), SPIN-code: [3556-8576](#), tukmakovda@imm.knc.ru

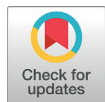
Authors contribution:

A. L. Tukmakov – development or design of research methodology, creation of models.

D. A. Tukmakov – implementation of the research process, including data collection; creation and preparation of the manuscript; visualization of research results.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 27.12.2024; revised 16.06.2025; accepted 11.08.2025

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.808-824>EDN: <https://elibrary.ru/zwcsoo>

УДК / UDK 53:519.7

Оригинальная статья / Original article

**Удельные показатели последствий отключений
в электрических сетях 110 кВ****А. В. Виноградова^{1,2,3}✉, А. В. Виноградов^{2,3}, А. К. Букреева¹**¹ *Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,**г. Москва, Российская Федерация*² *Орловский государственный аграрный университет**имени Н. В. Парахина,**г. Орел, Российская Федерация*³ *Российский государственный аграрный университет –**МСХА имени К. А. Тимирязева,**г. Москва, Российская Федерация*✉ alinawin@rambler.ru*Аннотация*

Введение. Сравнение последствий отключений в электрических сетях разных классов напряжения актуально для выработки стратегий в их проектировании и строительстве. Основная научная проблема выбора таких стратегий заключается в противоречии между необходимостью повышения надежности оборудования и минимизацией капитальных вложений и эксплуатационных издержек. Наиболее наглядное сравнение с возможностью масштабирования результатов проводится по удельным показателям последствий отключений, поэтому актуальной задачей является их оценка в электрических сетях 110 кВ для последующего сравнительного анализа.

Цель исследования. Провести сравнительный анализ удельных показателей надежности, характеризующих последствия отключений электрических сетей с напряжением 110 кВ и 0,4 кВ.

Материалы и методы. Проанализированы статистические данные аварийных и плановых отключений в электрических сетях 110 кВ за период с 2018 по 2023 гг. на территории Орловской области. Источником данных послужили журналы учета отключений, «Орелэнерго» (филиал ПАО «Россети Центр»). Суммарная протяженность рассматриваемых сетей составила более 1,7 тыс. км. Определены удельные показатели надежности, характеризующие последствия отключений в сетях 110 кВ, и выполнено их сравнение с аналогичными показателями для сетей 0,4 кВ.

Результаты исследования. Последствия аварийных отключений в сети 110 кВ по показателю удельной отключенной мощности на одно отключение в сетях 110 кВ в среднем в 50 раз превосходят последствия отключений в сети 0,4 кВ; с учетом всех причин отключений – в 17,5 раз. Среднее удельное время аварийных перерывов на одно отключение в сетях 0,4 кВ более чем в 5 раз превышает данный показатель

© Виноградова А. В., Виноградов А. В., Букреева А. К., 2025

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

в сетях 110 кВ. Удельный недоотпуск электроэнергии на одного потребителя в сетях 0,4 кВ выше, чем в сетях 110 кВ более чем в 2 160 раз с учетом всех причин отключений, а удельный недоотпуск электроэнергии на одно отключение в сетях 0,4 кВ выше в 18 раз. Средний суммарный недоотпуск по всем причинам в сетях 0,4 кВ более чем в 7 500 раз больше аналогичного показателя для сетей 110 кВ.

Обсуждение и заключение. Суммарные годовые последствия аварийности в электрических сетях 0,4 кВ превышают последствия аварийности в сетях 110 кВ. Следует пересмотреть нормы проектирования сетей 0,4 кВ в сторону повышения требований к надежности их конструкции и создания возможностей управления конфигурацией с целью автоматического резервирования питания потребителей. Это позволит значительно сократить ущерб для сельских потребителей и электросетевых организаций.

Ключевые слова: электрические сети, удельные показатели надежности, сети 110 кВ, сети 0,4 кВ, статические данные, количество отключений, недоотпуск электроэнергии, электроснабжение, надежность электроснабжения, последствия отключений

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Виноградова А.В., Виноградов А.В., Букреева А.К. Удельные показатели последствий отключений в электрических сетях 110 кВ. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):808–824. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.808-824>

Specific Indicators of the Consequences of Outages in 110 kV Electrical Networks

A. V. Vinogradova^{a,b,c}✉, A. V. Vinogradov^{b,c}, A. K. Bukreeva^a

^a *Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
Moscow, Russian Federation*

^b *Orel State Agrarian University named after N. V. Parakhin,
Oryol, Russian Federation*

^c *Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation*

✉ alinawin@rambler.ru

Abstract

Introduction. Comparing the effects of outages in electrical networks of different voltage classes is important for developing strategies for their design and construction. The main scientific problem when choosing such strategies arises from the contradiction between the need to increase the reliability of equipment and structures of electrical networks of all voltage classes and to minimize capital investments and operating costs. A comparison based on specific indicators is more visual and makes it possible to scale the results obtained. Thus, it is an urgent task to assess the specific indicators of the consequences of outages in 110 kV electrical networks for their subsequent comparison with similar indicators for networks of other voltage classes.

Aim of the Study. The study is aimed at conducting a comparative analysis of specific reliability indexes characterizing the consequences of outages in 110 kV and 0.4 kV electrical networks.

Materials and Methods. There were analyzed the statistical data of emergency and planned outages in 110 kV electrical networks in the Oryol region for the period from 2018 to 2023. The initial data were taken from the outage log books for the branch of PJSC

Rosseti Centre – Oryolenergo. The total length of the electrical networks considered was more than 1.7 thousand kilometers. Specific reliability indexes characterizing the consequences of outages in 110 kV electrical networks were determined and compared with similar indexes for 0.4 kV electrical networks.

Results. The study revealed that the consequences of emergency outages in the 110 kV electrical networks in terms of specific disconnected electrical power indicator per one outage in 110 kV electrical networks are on average about 50 times greater than the consequences of outages in the 0.4 kV electrical networks and taking into account all causes of outages – 17.5 times. The average specific time of emergency interruptions per one outage in 0.4 kV electrical networks is more than 5 times greater than in 110 kV electrical networks. Specific undersupply of electrical power per one consumer in 0.4 kV electrical networks is greater than in 110 kV electrical networks by more than 2,160 times taking into account all causes of disconnections while specific electrical power undersupply per outage disconnection in 0.4 kV electrical networks is 18 times greater. The average total undersupply of electrical power for all reasons in 0.4 kV electrical networks is more than 7,500 times greater than the same indicator for 110 kV electrical networks.

Discussion and Conclusion. The total annual consequences of accidents in 0.4 kV electrical networks are greater than the consequences of accidents in 110 kV electrical networks. It is necessary to revise the design standards for 0.4 kV electrical networks increasing the requirements for the reliability of their design and creating opportunities for configuration management, primarily for the purpose of automatic standby electrical power supply to consumers. This will significantly reduce damage to both rural consumers and power grid operators.

Keywords: power grids, specific reliability indexes, 110 kV electrical networks, 0.4 kV electrical networks, statistical data, number of outages, electrical power undersupply, electrical power supply, reliability of electrical power supply, consequences of outages

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

For citation: Vinogradova A.V., Vinogradov A.V., Bukreeva A.K. Specific Indicators of the Consequences of Outages in 110 kV Electrical Networks. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):808–824. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.808-824>

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы технологических отключений в электрических сетях 110 кВ особенно актуальны для Российской Федерации, где эти сети являются районными и имеют большую протяженность. Надежность данных сетей непосредственно влияет на надежность электроснабжения сельских потребителей, так как основная доля сетей 110 кВ приходится на сельскую местность. При этом их износ составляет по некоторым источникам до 92 % [1].

Сравнение последствий отключений в электрических сетях 110 кВ и 0,4 кВ позволит рационально выстраивать стратегии их проектирования и строительства. Это возможно за счет решения противоречий между необходимостью, с одной стороны, повышать надежность оборудования, конструкций электрических сетей обоих классов напряжения, другой – потребностью в сокращении удельных капитальных вложений и эксплуатационных издержек на километр строящихся и обслуживаемых сетей. Оценку целесообразно проводить по удельным показателям последствий отключений, что дает возможность масштабировать получаемые результаты. Ранее получены удельные показатели по сетям 0,4 кВ, поэтому актуальной является задача оценки удельных показателей последствий отключений

в электрических сетях 110 кВ для их последующего сравнения с аналогичными показателями по сетям других классов напряжения, в частности 0,4 кВ.

Цель исследования – провести сравнительный анализ удельных показателей надежности, характеризующих последствия отключений электрических сетей с напряжением 110 кВ и 0,4 кВ.

Задачи исследования сводятся к следующему:

- провести статистический анализ аварийных и плановых отключений воздушных линий 110 кВ Орловской области за период с 2018 по 2023 г. и вызванных ими последствий;
- рассчитать удельные показатели надежности, характеризующие последствия отключений в электрических сетях 110 кВ: количество отключенных потребителей, суммарный недоотпуск электроэнергии и др.;
- выполнить анализ рассчитанных удельных показателей по сетям 110 кВ и их сравнение с аналогичными по электрическим сетям 0,4 кВ.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В научной литературе широко освещен вопрос причин возникновения технологических отключений в сетях 110 кВ и разработке мероприятий по их устранению и снижению. В частности, в работе С. В. Смоловика, Ф. Х. Халилова исследованы причины утренних отключений воздушных линий (ВЛ) 110 кВ. Проведенный авторами анализ позволил выявить влияние сезонности метеорологических факторов на сезонность числа отключений по годам и времени суток [2]. Кроме того, рассмотрены причины и виды повреждений сетей 110 кВ [3; 4], проанализированы показатели аварийности данных сетей, предложены рекомендации по их устранению [5–7].

А. В. Виноградовым анализируется состояние оборудования сетей 110 кВ как фактор, непосредственно влияющий на показатели их надежности [8].

Требования по обеспечению нормативного уровня надежности электроснабжения потребителей как в нормальных, так и в послеаварийных режимах работы сети все больше ужесточаются. При этом методики расчетов надежности электроснабжения на нормативном уровне не корректируются. В то же время ряд ученых актуализирует информацию по современным показателям надежности электроснабжения [9; 10]. Проводится сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта нормирования надежности распределительных сетей [11].

Помимо анализа причин технологических отключений предлагаются решения по оптимизации расчетов надежности ВЛ 110 кВ. Предложен метод расчета показателей надежности ВЛ на основе данных по их протяженности с учетом сезонной нестационарности потока отказов линий¹.

Ряд исследований посвящен применению методов искусственного интеллекта для прогнозирования отказов [12; 13], точной классификации неисправностей [14]. Зарубежные ученые рассмотрели метод искусственного интеллекта

¹ Базан Т.В., Галабурда Я.В., Иселенок Е.Б. Анализ отключений воздушных линий 35–750 кВ. Актуальные проблемы энергетики. Электроэнергетические системы. Минск: БНТУ; 2020. С. 114–116. <https://rep.bntu.by/handle/data/73524/recent-submissions?offset=20>

для прогнозирования отключений в распределительных электрических сетях во время неблагоприятных погодных условий [15; 16].

Статистические данные об отключениях для нескольких районов Северо-Кавказского региона были исследованы А. М. Исуповой [17]. Автор акцентировала внимание на необходимости учета региональных особенностей исследуемого района. Так, для горной местности характерно функционирование сельских электрических сетей в условиях повышенной гололедной и ветровой нагрузки, особенно в весенние месяцы, что приводит к повышенному выходу из строя проводов, изменению положения опор и возможной их поломке. Кроме того, рассмотрен вопрос о нерациональном применении показателей надежности оказываемых услуг с помощью показателя средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии на точку поставки (Psaidd) и показателя средней частоты прекращения передачи электрической энергии на точку поставки (Psaifi) для рассмотрения эксплуатационных задач энергосистемы, так как они более показательны для энергосбытовой деятельности.

В рассмотренных работах, а также в других исследованиях не представлены данные об удельных показателях, характеризующих последствия отключений, таких как отключенная мощность на одного потребителя, отключенная мощность на одно отключение, время перерыва в электроснабжении на одно отключение, которые могли бы охарактеризовать последствия отключений в электрических сетях 110 кВ. Исследование данных показателей проводится в настоящей работе на примере электрических сетей Орловской области. Подобные показатели, также на примере Орловской области, оценены для сетей 0,4 кВ [18]. Это позволяет сравнить последствия отключений в сетях 110 и 0,4 кВ для одного региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования являются электрические сети 110 кВ Орловской области, предметом – удельные показатели их надежности, характеризующие последствия отключений в них.

Материалы исследования

Проведен статистический анализ аварийных и плановых отключений ВЛ 110 кВ Орловской области за период с 2018 по 2023 г. и вызванных ими последствий. Исходные данные взяты из журналов отключений по «Орелэнерго» (филиал ПАО «Россети Центр»). В журналах для каждого класса напряжения приводятся данные по времени начала и окончания отключения (аварийного или планового), указывается конкретная линия, на которой произошло отключение. Также приводятся сведения о количестве отключенных конечных потребителей (точек подключения), ущербе от отключения, отключенной мощности и др. Общее количество отключенных точек подключения при отключениях на линиях электропередачи (ЛЭП) 110 кВ указывается с учетом точек, запитанных на более низких напряжениях. Это связано с тем, что отключение ЛЭП 110 кВ может привести к отключениям и в сетях 35, 10, 6 и 0,4 кВ в случае, если не было обеспечено сетевое резервирование ЛЭП 110 кВ. Полученные из журналов данные были использованы для расчета удельных показателей надежности, характеризующих последствия отключений.

Общая протяженность анализируемых сетей составила более 1 700 км (изменяясь от 1 737,8 км в 2018 г. до 1 733,8 км в 2023 г.) [8]. В рассматриваемых электрических сетях Орловской области, по оценке на январь 2022 г., в очень хорошем состоянии со степенью физического износа менее 15 % находились 34 ВЛ 110 кВ (52 % от общего их количества в регионе); в хорошем состоянии со степенью физического износа в диапазоне от 15 до 30 % – 25 ВЛ 110 кВ (38 %); в удовлетворительном состоянии со степенью износа 30–50 % – 6 ВЛ 110 кВ (9 %). Линий, находящихся в неудовлетворительном и критическом состоянии на конец января 2022 г., не выявлено [8].

Методы и процедура исследования

Количество отключенных потребителей принималось по количеству точек присоединения (жилые дома, производственные объекты и т. п.). Суммарно отключенная мощность определялась на основе фактических замеров мощности в режимные дни на отходящих от подстанций линиях. При отключении конкретной линии замеренная в режимный день мощность принималась в качестве отключенной. Суммарный недоотпуск электроэнергии определялся с учетом отключенной мощности и продолжительности перерыва в электроснабжении. Кроме того, определен поток отключений по аварийным и плановым отключениям, а также общий на 100 км, год⁻¹.

Поток отключений $\omega(t)$, год⁻¹ на 100 км протяженности линий или 100 единиц оборудования определялся как отношение числа отказов (или плановых отключений) восстанавливаемого объекта (ЛЭП или другое оборудование) за рассматриваемый год $n_{ac/pli}$, откл. к общему числу наблюдаемых объектов, ед.:

$$\omega(t) = \frac{n_{ac/pli}}{L} \cdot 100, \quad (1)$$

где L – протяженность ЛЭП, км, или число оборудования, шт.; $n_{ac/pli}$ – количество аварийных или плановых отключений за заданный период времени, ед.

Удельное количество отключенных потребителей на одно отключение для каждого года N_{sg} , ед./откл. определялось как отношение числа отключенных (аварийно или планоно) потребителей $N_{ac/pli}$, ед. соответственно к числу аварийных или плановых отключений $n_{ac/pli}$ откл. в течение каждого рассматриваемого года:

$$N_{sg} = \frac{N_{ac/pli}}{n_{ac/pli}}. \quad (2)$$

Удельная отключенная мощность на одно отключение P_{sd} , МВт/откл., определялась как отношение суммарно отключенной мощности, $P_{ac/pli}$, МВт на количество отключений $n_{ac/pli}$, откл.:

$$P_{sd} = \frac{P_{ac/pli}}{n_{ac/pli}}. \quad (3)$$

Удельная отключенная мощность на одного потребителя P_{sc} , МВт/потр. определялась как отношение суммарно отключенной мощности $P_{ac/pli}$, МВт на количество отключенных потребителей $m_{ac/pli}$, ед.:

$$P_{sc} = \frac{P_{ac/pli}}{m_{ac/pli}}. \quad (4)$$

Удельное время перерыва в электроснабжении на одно отключение T_{sd} , ч/откл. рассчитывалось как отношение суммарного времени перерыва в электроснабжении за рассматриваемый год $T_{ac/pli}$ к количеству отключений $n_{ac/pli}$, откл.:

$$T_{sd} = \frac{T_{ac/pli}}{n_{ac/pli}}. \quad (5)$$

Удельный недоотпуск электроэнергии на одно отключение W_{sd} , МВт · ч/откл. и на одного потребителя W_{sc} , МВт ч/потр. рассчитывались соответственно, как отношение суммарного недоотпуска электроэнергии $W_{ac/pli}$ к количеству отключений, или к количеству отключенных потребителей:

$$W_{sd} = \frac{W_{ac/pli}}{n_{ac/pli}}; \quad W_{sc} = \frac{W_{ac/pli}}{m_{ac/pli}}. \quad (6)$$

Полученные значения удельных показателей сравнивались с аналогичными значениями по сетям 0,4 кВ [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приведены общие показатели надежности рассматриваемых сетей ВЛ 110 кВ за период с 2018 по 2023 г. Определено количество отключений в год, суммарная длительность перерывов в электроснабжении, суммарно отключенная мощность за год, количество отключенных потребителей и суммарный недоотпуск электроэнергии.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Общие показатели надежности воздушных линий 110 кВ за период с 2018 по 2023 г.

Overall reliability indicators of 110 kV overhead electrical power lines
for the period from 2018 to 2023

Причина отключений / Reason for outages	2018 г. / year	2019 г. / year	2020 г. / year	2021 г. / year	2022 г. / year	2023 г. / year	Среднее за 2018–2023 гг. / Average for 2018–2023
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Количество отключений в год/ Number of outages per year</i>							
Аварийные отключения, ед. / Emergency outages, units	57,0	51,0	49,0	44,0	1,0	43,0	40,8
Процент аварийных отклю- чений к общему числу / Percent of emergency outages to the to- tal number	59,4	55,4	65,3	54,3	50,0	39,4	54,0
Плановые отключения, ед. / Scheduled outages, units	39,0	41,0	26,0	37,0	1,0	66,0	35,0
Процент плановых отклю- чений к общему числу / Per- cent of planned outages to total number	40,6	44,6	34,7	45,7	50,0	60,6	46,0
Всего, ч / Total, h	96,0	92,0	75,0	81,0	2,0	109,0	75,8

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Суммарная длительность перерывов в электроснабжении / Total duration of electrical power supply interruptions</i>							
По причине аварийных отключений, ч / Due to emergency outages, h	4,6	5,1	4,2	2,4	1,7	0,4	3,07
Процент по причине аварийных отключений к общему времени / Percent due to emergency outages to total time	100,0	100,0	100,0	0,2	14,2	5,6	53,32
По причине плановых отключений, ч / Due to scheduled outages, h	0	0	0	1112,6	10,3	6,8	188,30/3,42*
Процент по причине плановых отключений к общему времени / Percent due to planned outages to total time	0	0	0	99,8	85,8	94,4	46,68/36,04*
Всего, ч / Total, h	4,6	5,1	4,2	1115,0	12,0	7,2	191,35/6,60*
<i>Суммарно отключенная мощность за год / Total cut-off power for the year</i>							
По причине аварийных отключений, МВт / Due to emergency shutdowns, MW	17,128	22,9	12,4	15,9	4,80	4,5	12,9
По причине плановых отключений, МВт / Due to planned outages, MW	0	0	0	36,5	1,07	3,6	6,9/0,934*
Всего, МВт / Total, MW	17,128	22,9	12,4	52,4	5,87	8,1	19,8/13,3*
<i>Количество отключенных потребителей, ед. / Number of disconnected consumers, units</i>							
По причине аварийных отключений / Due to emergency outages	45 954	17 724	11 335	16 031	913,9	846	15 467,3
По причине плановых отключений / Due to planned outages	0	0	0	154 234	1 891,1	13 945	28 345,0/ 3 167,2*
Всего / Total	45 954	17 724	11 335	170 265	2 805,0	14 791	43 812,3/ 18 521,8*
<i>Суммарный недоотпуск электроэнергии / Total electrical power undersupply</i>							
По причине аварийных отключений, МВт·ч / Due to emergency outages, MW·h	78,7888	116,79	52,08	38,16	8,160	1,80	49,3
По причине плановых отключений, МВт·ч / Due to planned outages, MW·h	0	0	0	40 609,90	11,021	24,48	6774,2/7,1*
Всего, МВт·ч / Total, MW·h	78,7888	116,79	52,08	40 648,06	19,181	26,28	6823,5/58,6*

Примечание: * – показатель рассчитан без учета значений «аномального» 2021 г.

Note: * – the indicator is calculated without taking into account the values of the “abnormal” 2021.

Источник: Таблицы 1,2 составлены авторами статьи на основании материалов анализа журналов отключений за 2018–2023 годы

Source: Tables 1,2 were compiled by the authors of the article based on the analysis of outage log books for 2018–2023

В таблице 1 ряд показателей определялся дополнительно без учета значений 2021 г. Это связано с тем, что в 2021 г. аномально высокими являлись значения суммарной длительности перерывов в электроснабжении по причине плановых отключений, которая составила 1 112,6 ч, в то время как в другие годы она не превышала 11 ч. Поэтому при использовании средних значений учитывать этот год не рационально. Аномалия была вызвана необходимостью планового отключения подстанций и линий 110 кВ без возможности резервирования питания потребителей при близком количестве отключений по сравнению с другими годами (37 отключений в год при среднем значении 35 отключений в год). Такие ситуации являются исключительными. Вместе с тем наличие в проанализированных данных подобной аномалии имеет практическую пользу, заключающуюся в оценке возможных последствий подобных сценариев плановых отключений. Так, суммарный недоотпуск электроэнергии вследствие плановых отключений при данном сценарии вырос до 40 609,9 МВт в год при среднем значении, не учитывающем «аномальный» год, – 7,1* МВт в год. Значение суммарного недоотпуска электроэнергии из-за плановых отключений 7,1* МВт в год более показательно, так как логично, что при плановых отключениях стремятся избежать неоправданного недоотпуска, запитывая потребителей по резервным схемам. Средний аварийный недоотпуск в среднем составляет 49,3 МВт, что в семь раз больше среднего планового.

Наблюдается неравномерность распределения всех показателей по годам. Длительные отключения в 2021 г., связанные с проведением реконструкции сетей 110 кВ, повлияли на то, что состояние сетей 110 кВ в регионе на 2022 г. можно было охарактеризовать в среднем как хорошее [8]. Реконструкция сетей стала причиной того, что аварийных и плановых отключений в 2022 г. почти не было. В 2023 г. наблюдался рост плановых отключений до 66 раз в год. На рост количества плановых отключений в 2021 г. сильно повлияла пандемия COVID-19 в 2020 г. и связанная с ней самоизоляция, так как возникла сложность планирования и проведения плановых ремонтов сетей 110 кВ.

Результаты расчета удельных показателей надежности, характеризующих последствия отключений, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Расчетные удельные показатели надежности

Estimated specific reliability indexes

Причина отключений / Reason for outages	2018 г. / year	2019 г. / year	2020 г. / year	2021 г. / year	2022 г. / year	2023 г. / year	Среднее за 2018–2023 гг. / Average for 2018–2023
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Поток отключений на 100 км, год⁻¹ / Outage flow per 100 km, year⁻¹</i>							
По причине аварийного отключения / Due to emergen- cy outages	3,28	2,94	2,82	2,53	0,06	2,48	2,4
По причине преднамерен- ного отключения / Due to intentional outages	2,25	2,36	1,50	2,13	0,06	3,80	2,0

Окончание табл. 2 / End of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8
По всем причинам / For all reasons	5,53	5,30	4,32	4,67	0,12	6,28	4,4
<i>Удельное количество отключенных потребителей на одно отключение, ед./откл. / Specific number of disconnected consumers per one outage, unit/outages</i>							
По причине аварийного отключения / Due to emergency outages	806	347	231	364	914	20	447
По причине преднамеренного отключения / Due to intentional outages	0	0	0	4 168	1 891	211	1 045
По всем причинам / For all reasons	806	347	231	4 532	2 805	231	1 492
<i>Удельная отключенная мощность на одно отключение, МВт/откл. / Specific disconnected capacity per one outage, MW/disabling</i>							
На одно аварийное отключение / Per one emergency outage	0,30	0,45	0,25	0,36	4,80	0,10	1,0
На одно плановое отключение / Per one planned outage	0,00	0,00	0,00	0,99	1,07	0,05	0,4
По всем причинам / For all the reasons	0,18	0,25	0,17	0,65	2,94	0,07	0,7
<i>Удельная отключенная мощность на одного потребителя, МВт/потр. / Specific disconnected capacity per consumer, MW/consumer</i>							
При аварийном отключении / In case of emergency outage	0,0004	0,0013	0,0011	0,00100	0,00530	0,00530	0,0024
При плановом отключении / In case of planned outage	0	0	0	0,00024	0,00057	0,00026	0,0002
По всем причинам / For all the reasons	0,0004	0,0013	0,0011	0,00124	0,00587	0,00556	0,0026
<i>Удельное время перерыва в электроснабжении на одно отключение, ч/откл. / Specific time of electrical power supply interruption per one outage, h/disabling</i>							
По причине аварийных отключений / Due to emergency outages	0,08	0,10	0,09	0,05	1,70	0,01	0,30
По причине плановых отключений / Due to planned outages	0	0	0	30,07	10,30	0,10	6,70/2,08*
По всем причинам / For all reasons	0,08	0,10	0,09	13,77	6,00	0,07	3,30/1,30*
<i>Удельный недоотпуск электроэнергии на одно отключение, МВт·ч/откл. / Specific undersupply of electrical power per one outage, MW h/disabling</i>							
При аварийных отключениях / During emergency shutdowns	1,38	2,29	1,06	0,87	8,16	0,04	2,30
При плановых отключениях / During planned shutdowns	0	0	0	1097,56	11,02	0,37	184,83/2,28*
По всем причинам / For all reasons	0,82	1,27	0,69	501,83	9,59	0,24	85,74/2,52*
<i>Удельный недоотпуск электроэнергии на одного потребителя, МВт·ч/потр. / Specific underproduction of electricity per consumer, MW h/consumer</i>							
При аварийных отключениях / During emergency outages	0,002	0,007	0,005	0,002	0,009	0,002	0,0045
При плановых отключениях / During planned outages	0	0	0	0,263	0,006	0,002	0,05/0,0016*
По всем причинам / For all reasons	0,002	0,007	0,005	0,239	0,007	0,002	0,04/0,002*

Примечание: * – показатель рассчитан без учета значений «аномального» 2021 г.

Note: * – the indicator is calculated without taking into account the values of the “abnormal” 2021.

В приведенных показателях (табл. 2) также дополнительно определены значения, не учитывающие «аномальный» 2021 г., что позволяет получить более достоверные средние значения показателей.

Следует отметить довольно равномерные значения потоков как аварийных (среднее значение $2,4 \text{ год}^{-1}$ на 100 км), так и плановых (среднее значение $2,4 \text{ год}^{-1}$ на 100 км) отключений при среднем потоке отключений по всем причинам $4,4 \text{ год}^{-1}$ на 100 км.

Удельная аварийная отключенная мощность на одно отключение характеризует мощность, которая была отключена в результате одного инцидента. Ее значения варьируются от наивысших значений в 2022 г. – 4,80 МВт, до минимальных в 2023 г. – 0,10 МВт, а среднее значение за шесть лет составило 1 МВт. Если сравнить эти значения со средней удельной аварийной отключенной мощностью по сети 0,4 кВ (0,02 МВт) [15], то можно сделать вывод, что последствия аварийных отключений в сети 110 кВ по этому показателю в среднем примерно в 50 раз превосходят последствия отключений в сети 0,4 кВ. Последствия плановых отключений (0,4 и 0,05 МВт соответственно) отличаются примерно в восемь раз. По всем причинам отключений (0,7 и 0,04 МВт соответственно) рассматриваемый показатель выше в 17,5 раз для сетей 110 кВ. Это связано с тем, что при отключении в сети 110 кВ одновременно отключается большее количество потребителей.

Интерес представляет сравнение показателя удельного времени перерывов в электроснабжении на одно отключение, среднее значение которого для сети 110 кВ составляет $1,3^* \text{ ч}$ при средних аварийных $0,3 \text{ ч}$ и средних плановых $2,08^* \text{ ч}$. Для сетей 0,4 кВ значения аналогичных показателей составляют 2,4, 1,6 и 3 ч соответственно [18]. Следовательно, среднее время аварийных перерывов на одно отключение в сетях 0,4 кВ более чем в пять раз превышает время перерыва в сетях 110 кВ. По плановым перерывам отношение составляет более 1,4 раза, а по всем причинам – более 2 раз. Это связано прежде всего с различной конфигурацией сетей 110 и 0,4 кВ. В сетях 110 кВ имеются возможности резервирования при большей части плановых отключений, в то время как в сетях 0,4 кВ таких возможностей, как правило, нет [19].

Таким образом, удельный недоотпуск электроэнергии на одного потребителя при аварийных отключениях колеблется в небольших пределах с наибольшим значением $0,009 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ в 2022 г. При плановых отключениях наблюдается более значительное изменение. Например, в 2021 г. значение составило $0,263 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, затем резко упало в 2023 г., а в 2022 г. снова увеличилось до $0,05 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, что указывает на изменения в планировании и управлении отключениями, а также на различия в потреблении электроэнергии в зависимости от года. Среднее значение показателя без учета 2021 г. составило по всем причинам $0,002^* \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, по аварийным отключениям – $0,0045 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, а по плановым отключениям – $0,0016^* \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Для сети 0,4 кВ аналогичные показатели составляют 6,5, 2,4 и $4,7 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ [19], т. е. они выше более чем в 3 250, 530 и 2 937 раз соответственно. Это связано со значительно большим удельным количеством отключенных потребителей на одно отключение, которое в сетях 110 кВ для аварийных отключений составляет 379,1 отключенного потребителя на одно отключение, а в сетях 0,4 кВ – 14,8 отключенных

потребителей на одно отключение. Также это связано с отсутствием возможности резервирования питания потребителей в сетях 0,4 кВ, то есть недостатками их конфигурации.

Удельный недоотпуск электроэнергии на одно отключение в сетях 110 кВ составляет в среднем по всем видам отключений $2,52^*$ МВт·ч, по аварийным – $2,30$ МВт·ч, по плановым – $2,28^*$ МВт·ч. По сетям 0,4 кВ это соответственно 41,1, 239,1 и 252 МВт·ч для нагрузки, содержащей как коммунально-бытовую, так и производственную части [18], т. е. в 18, 104 и 100 раз больше соответственно. Причина такой разницы также в недостатках конфигурации сетей 0,4 кВ.

Полученные в ходе анализа данные позволяют провести сравнительную характеристику последствий отключений в сетях 110 и 0,4 кВ, которая может использоваться при обосновании решений при создании проектов строительства новых сетей или их реконструкции. Сравнение показывает, что, несмотря на большие значения удельной суммарной отключенной мощности в сетях 110 кВ, удельные значения по таким показателям как удельное время перерывов в электроснабжении, удельный недоотпуск электроэнергии на одного потребителя и на одно отключение гораздо выше в сетях 0,4 кВ, что связано с недостатками конфигурации данных сетей, отсутствием возможности автоматического резервирования в них. Эти недостатки и заложенные в конструкции сетей невысокие показатели надежности приводят к тому, что средний суммарный недоотпуск по всем причинам в сетях 0,4 кВ составляет 441 402,24 МВт·ч в год, а в сетях 110 кВ – $58,6^*$ МВт·ч в год, т. е. в сетях 0,4 кВ он более чем в 7 500 раз больше. Данное явление естественно, так как число отключений в сетях 0,4 кВ составляет в среднем $3\,904\text{ год}^{-1}$, в то время как в сетях 110 кВ среднее количество отключений меньше более чем в 51 раз и составляет $75,8\text{ год}^{-1}$.

Таким образом, суммарные последствия от аварийности в электрических сетях 0,4 кВ превышают последствия от аварийности в сетях 110 кВ. Если учесть, что эксплуатация сетей 0,4 кВ требуеткратно больших затрат в связи с более высокой их протяженностью и аварийностью, то можно сделать вывод, что необходимо пересмотреть нормы проектирования сетей 0,4 кВ в сторону повышения требований к надежности их конструкции, что позволит в разы сократить ущерб как для сельских потребителей, так и для электросетевых организаций.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение таких показателей, как удельное количество отключенных потребителей и значение отключенной мощности на одно отключение, удельный недоотпуск электроэнергии на одно отключение и на одного потребителя, удельное время перерывов на одно отключение и других по электрическим сетям разных классов напряжения, позволяют оценить последствия отключений в данных сетях и сравнить их между собой.

Анализ статистических данных с 2018 по 2023 г. по аварийным и плановым отключениям в электрических сетях 110 кВ на примере Орловской области позволил определить удельные показатели надежности и сравнить их с аналогичными показателями для сетей 0,4 кВ. Сравнение показало, что удельная отключенная

мощность на одно отключение в среднем примерно в 17,5 раз выше в сетях 110 кВ с учетом как аварийных, так и плановых отключений. В сетях 0,4 кВ среднее удельное время перерывов в электроснабжении на одно отключение более чем в 2 раза превышает данный показатель для сетей 110 кВ. Удельный недоотпуск электроэнергии на одного потребителя в сетях 0,4 кВ выше, чем в сетях 110 кВ, более чем в 3 250 раз по всем причинам отключений, а удельный недоотпуск электроэнергии на одно отключение в сетях 0,4 кВ выше в 18 раз. Средний суммарный недоотпуск электроэнергии в год с учетом плановых и аварийных отключений в сетях 0,4 кВ превышает аналогичный показатель сетей 110 кВ более чем в 7 500 раз.

Исследование показало, что суммарные годовые последствия от аварийности в электрических сетях 0,4 кВ превышают последствия от аварийности в сетях 110 кВ. Это связано с тем, что при проектировании конструктивных элементов сетей 0,4 кВ закладываются более низкие показатели надежности, а также с недостатками конфигурации сетей 0,4 кВ. Эти недостатки заключаются в отсутствии решений по применению средств секционирования и резервирования сетей, других средств управления их конфигурацией. Если учесть, что эксплуатация сетей 0,4 кВ требуеткратно больших затрат в связи с более высокой их протяженностью и аварийностью, то рациональным будет пересмотр норм проектирования сетей 0,4 кВ в сторону повышения требований к надежности их конструкции и создания возможностей управления конфигурацией, в первую очередь с целью автоматического резервирования питания потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумов И.В. Особенности электропередачи в распределительных электрических сетях (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Ульяновские распределительные сети»). *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2024;9(1):118–126. <https://doi.org/10.25744/genb.2024.55.33.017>
2. Боровицкий В.Г., Овсянников А.Г. Анализ причин утренних отключений ВЛ 110 кВ. *Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2014;(2):38–41. <https://elibrary.ru/sltxzx>
3. Yang L., Teh J. Review on Vulnerability Analysis of Power Distribution Network. *Electric Power Systems Research*. 2023;224:109741. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109741>
4. Наумов И.В. Прогностическая оценка функционального состояния электрических сетей на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Самарские распределительные сети». *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2024;17(1):92–106. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/number/152577> (дата обращения: 15.02.2025).
5. Наумов И.В. Причины аварийности в распределительных электрических сетях (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Саратовские распределительные сети»). *Надежность и безопасность энергетики*. 2024;17(2):88–97. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2024-17-2-88-97>
6. Михалкова Е.Г., Турсумбекова А.Б. Применение актуальных технических решений для повышения эффективности работы распределительных электрических сетей. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019;(11):163–172. <https://www.elibrary.ru/sosnit>
7. Дайментов А.Э. Анализ современного состояния методов и моделей прогнозирования в электроснабжении. *Вестник науки*. 2025;4(4):1134–1139. URL: <https://www.xn----8sbempclcwd3bmt.xn--p1ai/article/22649> (дата обращения: 20.02.2025).
8. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ технического состояния и срока нахождения в эксплуатации воздушных линий электропередачи 35–110 кВ Орловской области.

- Вестник МГТУ*. 2022;25(4):324–333. URL: <https://vestnik.mauniver.ru/show.shtml?art=2151> (дата обращения: 22.02.2025).
9. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Определение современных показателей надежности воздушных линий электропередачи 0,4–110 кВ. *Агроинженерия*. 2023;25(1):77–85. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-77-85>
 10. Виноградов А.В., Васильев А.Н., Семенов А.Е. Синяков А.Н., Большев В.Е. Анализ времени перерывов в электроснабжении сельских потребителей и методы его сокращения за счет мониторинга технического состояния линий электропередачи. *Вестник ВИЭСХ*. 2017(2):3–11. URL: <https://vestnik.vieshvim.ru/journal/vypusk-2-27-2017/> (дата обращения: 22.02.2025).
 11. Гвоздев Д.Б., Габдушев Д.М., Гоенко Р.Ю., Климкина Д.И., Буянков Д.А., Ванин А.С. Анализ отечественного и зарубежного опыта нормирования надежности распределительных сетей. *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2023;(5):26–33. URL: <https://eepir.ru/article/analiz-otchestvennogo-i-nbsp-zarubezhnogo-opyta-normirovaniya-nadezhnosti-raspredelitelnyh-setej/> (дата обращения: 14.03.2025).
 12. Sood S. Power Outage Prediction Using Machine Learning Technique. In: International Conference on Power Energy, Environment & Intelligent Control (PEEIC). Greater Noida. 2023;78–80. <https://doi.org/10.1109/PEEIC59336.2023.10451753>
 13. Eskandarpour R., Khodaei A. Leveraging Accuracy-Uncertainty Tradeoff in SVM to Achieve Highly Accurate Outage Predictions. *IEEE Transactions on Power Systems* 2018;33(1):1139–1141. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2759061>
 14. Warlyani P., Jain A., Thoke A.S., Patel R.N. Fault Classification and Faulty Section Identification in Teed Transmission Circuits Using ANN. *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 2011;(3):807–811. URL: https://www.researchgate.net/publication/272912920_Fault_Classification_and_Faulty_Section_Identification_in_Teed_Transmission_Circuits_Using_ANN (дата обращения: 20.03.2025).
 15. Hou H., Zhang Z., Yu S., Huang Y., Zhang Y., Dong Z. Damage Prediction of Transmission Lines under Typhoon Disasters Considering Multi-Effect. *Journal of Smart Environments and Green Computing* 2021;(2):90–102. <https://doi.org/10.20517/jsegc.2020.04>
 16. Alqudah M., Obradovic Z. Enhancing Weather-Related Outage Prediction and Precursor Discovery Through Attention-Based Multi-Level Modeling. *IEEE Access* 2023;11:94840–94851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3303110>
 17. Исупова А.М. Хорольский В.Я., Мастепаненко М.А., Епифанов А.П. Оценка эксплуатационной надежности сельских электрических сетей по статистическим данным об отключениях. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2023;(5):121–139. URL: <https://spbgau.ru/life/newspaper/zhurnal-izvestiya/#> (дата обращения: 15.02.2025).
 18. Виноградова А.В., Виноградов А.В., Букреев А.В. Удельные показатели надежности электрических сетей 0,4 кВ. *Агроинженерия*. 2024;26(6):77–85. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-77-85>
 19. Виноградов А.В., Крамской С.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Обоснование мощности генераторов для резервирования в секционированных линиях электропередачи. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024;71(3):27–34. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-3-27-34>

REFERENCES

1. Naumov I.V. Features of Power Transmission in Distribution Electric Networks (On the Example of the Branch of Pjsc Rossetti Volga – Ulyanovsk Distribution Networks). *Grozny Natural Science Bulletin*. 2024; 9(1):118–126. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25744/genb.2024.55.33.017>
2. Borovitsky V.G., Ovsyannikov A.G. [Analysis of the Causes of Morning Outages in the 110 kV Electrical Networks]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2014;(2):38–41. (In Russ.) <https://elibrary.ru/sltzxz>

3. Yang L., Teh J. Review on Vulnerability Analysis of Power Distribution Network. *Electric Power Systems Research*. 2023;224:109741. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109741>
4. Naumov I.V. Prognostic Assessment of the Electric Networks Functional State Using the Example of the Pjsc Rossetti Volga – Samara Distribution Networks Branch. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2024;17(1):92–106. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://journal.sfu-kras.ru/number/152577> (accessed 15.02.2025).
5. Naumov I.V. Causes of Accidents in Electrical Distribution Networks (Using the Example of the Branch of Pjsc Rossetti Volga – Saratov Distribution Networks). *Safety and Reliability of Power Industry*. 2024;17(2):88–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2024-17-2-88-97>
6. Mihalkova E.G., Ursumbekova A.B. Applying Up-To-Date Technical Solutions for Improving the Efficiency of Electrical Networks. *Aktual'nye Nauchnye Issledovaniya v Sovremennom Mire*. 2019;(11):163–172. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/sosnit>
7. Daimentov A.E. Analysis of the Current State of Forecasting Methods and Models in Power Supply. *Vestnik Nauki*. 2025;4(4):1134–1139. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.xn---8sbempclcw3bmt.xn--p1ai/article/22649> (accessed 20.02.2025).
8. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the Technical Condition and Service Life of 35–110 kV Overhead Power Lines in the Oryol Region. *Vestnik of MSTU*. 2022;25(4):324–333. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.mauniver.ru/show.shtml?art=2151> (accessed 22.02.2025).
9. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Determination of Modern Reliability Indicators of 0.4–110 Kv Overhead Power Transmission Lines. *Agricultural Engineering*. 2023;25(1):77–85. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-77-85>
10. Vinogradov A.V., Vasilev A.N., Semenov A. E., Sinyakov A.N., Bolshev V.E. Analysis of Power Interruption Time for Rural Consumers and Methods of its Reduction by Means of Technical Condition Monitoring of Power Lines. *Vestnik VIESH*. 2017;(2):3–11. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.vieshim.ru/journal/vypusk-2-27-2017/> (accessed 22.02.2025).
11. Gvozdev D.B., Gabdushev D.M., Goyenko R.Yu., Klimkina D.I., Buyankov D.A., Vanin A.S. Analysis of Domestic and Foreign Practices of Distribution Network Reliability Specification. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2023;(5):26–33. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://eepir.ru/article/analiz-otechestvennogo-i-nbsp-zarubezhnogo-opyta-normirovaniya-nadezhnosti-raspredelitelnyh-setej/> (accessed 14.03.2025).
12. Sood S. Power Outage Prediction Using Machine Learning Technique. In: International Conference on Power Energy, Environment & Intelligent Control (PEEIC). Greater Noida. 2023;78–80. <https://doi.org/10.1109/PEEIC59336.2023.10451753>
13. Eskandarpour R., Khodaei A. Leveraging Accuracy-Uncertainty Tradeoff in SVM to Achieve Highly Accurate Outage Predictions. *IEEE Transactions on Power Systems* 2018;33(1):1139–1141. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2759061>
14. Warlyani P., Jain A., Thoke A.S., Patel R.N. Fault Classification and Faulty Section Identification in Teed Transmission Circuits Using ANN. *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 2011;(3):807–811. Available at: https://www.researchgate.net/publication/272912920_Fault_Classification_and_Faulty_Section_Identification_in_Teed_Transmission_Circuits_Using_ANN (accessed 20.03.2025).
15. Hou H., Zhang Z., Yu S., Huang Y., Zhang Y., Dong Z. Damage Prediction of Transmission Lines under Typhoon Disasters Considering Multi-Effect. *Journal of Smart Environments and Green Computing* 2021;(2):90–102. <https://doi.org/10.20517/jsegc.2020.04>
16. Alqudah M., Obradovic Z. Enhancing Weather-Related Outage Prediction and Precursor Discovery Through Attention-Based Multi-Level Modeling. *IEEE Access* 2023;11:94840–94851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3303110>
17. Isupova A.M., Khorolskiy V.Ya., Mastepanenko M.A., Epifanov A.P. Assessment of Operational Reliability of Rural Electric Networks by Statistical Data on Outages. *Izvestiya Saint-Petersburg State*

- Agrarian University*. 2023;(5):121–139. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://spbgau.ru/life/newspaper/zhurnal-izvestiya/#> (accessed 15.02.2025).
18. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V., Bukreev A.V. Specific Reliability Indicators of 0.4 Kv Electrical Networks. *Agricultural Engineering*. 2024;26(6):77–85. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-77-85>
 19. Vinogradov A.V., Kramskoy S.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Justification of Generator Power for Redundancy in Partitioned Power Grids. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2024;71(3):27–34. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-3-27-34>

Об авторах:

Виноградова Алина Васильевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5); доцент кафедры электроснабжения Орловского государственного аграрного университета (302019, Российская Федерация, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69); доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>, Scopus ID: 57204152403, SPIN-код: 8836-8684, alinawin@rambler.ru

Виноградов Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Электроснабжения Орловского государственного аграрного университета (302019, Российская Федерация, г. Орел, ул. Генерала Родина, д. 69); профессор кафедры электроснабжения и теплоэнергетики Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>, SPIN-код: 6652-9426, winaleksandr@gmail.com

Букреева Анжела Канвековна, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>, SPIN-код: 4079-4380, anzhelabukreeva@mail.ru

Вклад авторов:

А. В. Виноградова – формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

А. В. Виноградов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

А. К. Букреева – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 14.03.2025; поступила после рецензирования 19.09.2025;
принята к публикации 24.09.2025*

About the authors:

Alina V. Vinogradova, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of Power Supply, Electrical Equipment and Renewable Energy, Federal Scientific Agroengineering Center VIM
Electrical technologies and equipment

(5 Institutsky Passage 1st, Moscow 109428, Russian Federation); Associate Professor of the Department of Power Supply, Orel State Agrarian University (69 Generala Rodina St., Orel 302019, Russian Federation); associate Professor of the Department of Power Supply and Thermal Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8935-7086>, Scopus ID: 57204152403, SPIN-code: 8836-8684, alinawin@rambler.ru

Alexander V. Vinogradov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Power Supply, Orel State Agrarian University (69 Generala Rodina St., Orel 302019, Russian Federation); Professor of the Department of Power Supply and Thermal Power Engineering, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8845-9718>, SPIN-code: 6652-9426, winalleksandr@gmail.com

Angela K. Bukreeva, Cand.Sci. (Eng.), Research Associate, Laboratory of Power Supply, Electrical Equipment and Renewable Energy, Federal Scientific Agroengineering Center of VIM (5 Institute Proezd 1st, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8582-1080>, SPIN-code: 4079-4380, anzhelabukreeva@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Vinogradova – formulating the study idea, goals and objectives; conducting the study, including conducting experiments and collecting data; preparing the manuscript: writing a draft of the manuscript.

A. V. Vinogradov – supervision, leadership and mentoring in the process of planning and conducting research; formulating the study ideas, goals and objectives; conducting the study, including conducting experiments and collecting data; creation preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by members of the research team, including at the stages before and after publication.

A. K. Bukreeva – conducting the study, including conducting experiments and collecting data; preparing the manuscript: writing a draft of the manuscript.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 14.03.2025; revised 19.09.2025; accepted 24.09.2025

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

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

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.
2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Цель статьи (Aim of the Article);
- 3) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 4) Результаты исследования (Results);
- 5) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список литературы** (оформляется в соответствии с требованиями Ванкуверского стиля). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад авторов.** Для формулировки фактического вклада каждого соавтора в выполненную работу необходимо использовать таксономию CRediT (Contributor Roles Taxonomy) – стандарт, разработанный Национальной организацией по информационным стандартам (National Information Standards Organization, NISO) (<https://credit.niso.org/>). Порядок указания авторов и соавторов статьи согласуется ими самостоятельно. *Приводится на русском и английском языках.*

10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением BOAI открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Чаткин Михаил Николаевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-44-20.

Гордина Екатерина Павловна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

Engineering Technologies and Systems journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and iThenticate systems.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification (UDC)** code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Aim of the Article;

3) Materials and Methods;

4) Results;

5) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be formatted in accordance with the requirements of the Vancouver Style. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Authors contribution.** To formulate the actual contribution of each co-author to the work performed, it is necessary to use the taxonomy CRediT (Contributor Roles Taxonomy), a standard developed by the National Information Standards Organization (NISO) (<https://credit.niso.org/>). The order of indication of authors and co-authors of the article is agreed by them independently.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levtshev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Mikhail N. Chatkin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254420.

Ekaterina P. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.



Редакторы – *А. В. Савонина, С. Х. Зинина*
Перевод *Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. А. Климкиной*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 15.12.2025 г. Дата выхода в свет 29.12.2025 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 19,18.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 691. 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 15.12.2025. Date of publishing 29.12.2025.
Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 19.18.
Number of copies 1 000. 1st edition – 100 copies. Order no. 691. Free price.

Address of Printing Office: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing Office of National Reserch Mordovia State University)

**Редакция научных журналов Высшей школы развития
научно-образовательного потенциала МГУ им. Н. П. Огарёва
представлена следующими изданиями**



**ИНТЕГРАЦИЯ
ОБРАЗОВАНИЯ**



**ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И СИСТЕМЫ**



РЕГИОНОЛОГИЯ



ФИННО-УГОРСКИЙ МИР



**МЕДИЦИНА
И БИОТЕХНОЛОГИИ**



БАХТИНСКИЙ ВЕСТНИК



ОГАРЁВ-ONLINE

Квитанция для приобретения печатной версии журнала «Инженерные технологии и системы»

Извещение	Форма № ПД-4	
	УФК по Республике Мордовия (ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» л/с 20096Х35120) КПП 132601001	
	(наименование получателя платежа)	
	1326043499 03214643000000010900	
	(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)	
	40102810345370000076	
	корреспондентский счет	
	Отделение-НБ РЕСПУБЛИКА МОРДОВИЯ БАНКА РОССИИ//УФК по Республике Мордовия г. Саранск БИК 018952501	
	(наименование банка получателя платежа)	
	КБК 00000000000000000440 ОКТМО 89701000	
Кассир	за реализацию журнала "Инженерные технологии и системы"	
	(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)	
	Ф.И.О. плательщика: _____	
	Адрес плательщика: _____	
	Сумма платежа: <u>500</u> руб. <u>00</u> коп. Сумма платы за услуги: _____ руб. _____ коп.	
	Итого _____ руб. _____ коп. " " _____ 20 г.	
	С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____	
	Квитанция Кассир	УФК по Республике Мордовия (ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» л/с 20096Х35120) КПП 132601001
(наименование получателя платежа)		
1326043499 03214643000000010900		
(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)		
40102810345370000076		
корреспондентский счет		
Отделение-НБ РЕСПУБЛИКА МОРДОВИЯ БАНКА РОССИИ//УФК по Республике Мордовия г. Саранск БИК 018952501		
(наименование банка получателя платежа)		
КБК 00000000000000000440 ОКТМО 89701000		
за реализацию журнала "Инженерные технологии и системы"		
(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)		
Ф.И.О. плательщика: _____		
Адрес плательщика: _____		
Сумма платежа: <u>500</u> руб. <u>00</u> коп. Сумма платы за услуги: _____ руб. _____ коп.		
Итого _____ руб. _____ коп. " " _____ 20 г.		
С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____		

✂ — линия отреза