

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

2025 ^{Tom}Vol. 35 [№]No. 2

DOI: 10.15507/2658-4123

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502>

ISSN 2658-4123, eISSN 2658-6525

Том 35, № 2. 2025

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

16+



Vol. 35, no. 2. 2025

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

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

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

Главный редактор П. В. Сенин

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

Editor-in-Chief P. V. Senin

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
реестровая запись ПИ № ФС77-74640 от 24.12.2018 г.

Подписной индекс – **70539**

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

Founder, Publisher and Editorial House address:
68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005,
Republic of Mordovia,
Russian Federation
Tel/Fax: +7 8342 481424

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

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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



Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Science Citation Index (RSCI)

Russian Index of Science Citation

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

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

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

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

Alexey P. Levitsev – *Deputy Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Heat and Power Systems, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, levtzevap@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Mikhail N. Chatkin – *Deputy Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mobile Energy Facilities and Agricultural Machines named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru (Saransk, Russian Federation)

Ekaterina P. Gordina – *Executive Editor*, National Research Mordovia State University, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Surkhay Allahverdiyev – Dr.Sci. (Biol.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Chair of Ecology and Nature Management, Moscow Pedagogical State University (Moscow, Russian Federation); Head of the Forest Industry Chair, Bartin University (Bartın, Turkey)

Mikhail V. Astakhov – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611> (Kaluga, Russian Federation)

Alexey G. Bulgakov – Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University (Kursk, Russian Federation); Professor of the Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4261-9840> (Dresden, Germany)

Daifen Chen – Ph.D., Professor, Dean of the School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology; Director of the International Joint Laboratory of Ship Green Power and Emission Control of Jiangsu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-2199> (Zhenjiang, China)

Valeriy P. Dimitrov – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674> (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Liliya V. Fedulova – Dr.Sci. (Eng.), Professor of RAS, Head of the Experimental Clinic of the Laboratory of Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbатов Federal Research Center of Food Systems, Russian Academy of Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-930X> (Moscow, Russian Federation)

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

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

Leonid A. Igumnov – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Principal Researcher of Research Institute of Mechanics, Lobachevsky 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

Чугунов М. В., Полунина И. Н., Овчинников А. Ю. Прототип беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land	186
Карцев И. С. Повышение производительности конических мельниц за счет использования внешних колебаний	204
Бутовченко А. В., Копейкина А. П., Бастрыкина Д. Е., Чеботарёв М. А., Жигайлов Ф. Ю. Моделирование и методика исследования процесса транспортирования сыпучей среды шнековыми транспортерами	225

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Мухаметдинов А. М., Мударисов С. Г. Экспериментальная оценка параметров двухфазных течений в пневмосистеме посевного комплекса	243
Чаплыгин М. Е., Старостин И. А., Овчаренко А. С. Концептуальные основы создания электрического селекционного комбайна с комбинированной энергетической установкой	266
Зинцов А. Н., Ковалев М. М., Перов Г. А. Анализ процессов формирования и сохранения прямолинейности лент растений при уборке льна	284
Пархоменко Г. Г., Божко И. В., Камбулов С. И., Бужинский Н. В. Результаты исследования экспериментального образца рабочего органа глубокорыхлителя на переуплотненной почве	298
Джаббаров Н. И., Добринов А. В., Мишанов А. П., Савельев А. П. Моделирование эмиссии углекислого газа при обработке почвы	318

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Верма А., Тивари П., Шарма Д. Д. Сочетание эволюционных алгоритмов и методов прямого поиска для улучшения динамических характеристик солнечной энергетической системы, подключенной к сети (на англ. яз.)	333
<i>Информация для авторов и читателей</i>	355

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

Chugunov M. V., Polunina I. N., Ovchinnikov A. Yu. Prototype of an Electric Vehicle Based on Bigo.Land	186
Kartsev I. S. Improving the Productivity of Conical Mills by Using External Vibrations	204
Butovchenko A. V., Kopeikina A. P., Bastrykina D. E., Chebotarev M. A., Zhigailov F. Yu. Simulation and Research Methodology for the Process of Conveying Bulk Materials by Screw Conveyors	225

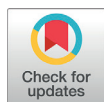
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Mukhametdinov A. M., Mudarisov S. G. Experimental Estimation of Two-Phase Flow Parameters in the Pneumatic System of a Sowing Complex	243
Chaplygin M. E., Starostin I. A., Ovcharenko A. S. Conceptual Basis for Developing Electric Plot Combine Harvester with Combined Power-Generating Plant	266
Zintsov A. N., Kovalev M. M., Perov G. A. Analyzing the Process of Formation and Retaining of Straightness of Flax Stem Strips during Flax Harvesting	284
Parkhomenko G. G., Bozhko I. V., Kambulov S. I., Buzhinsky N. V. Results of the Study of Using the Experimental Sample of the Deep Ripper Tool on Overconsolidated Soil	298
Jabborov N. I., Dobrinov A. V., Mishanov A. P., Savelyev A. P. Simulating Carbon Dioxide Emissions when Cultivating Soil	318

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Verma A., Tiwari P., Sharma D. D. Combination of Evolutionary Algorithms and Direct Search Approaches for Improving the Dynamic Performance of Grid Connected Solar Power System	333
Information for Authors and Readers of the Journal	355

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.186-203>EDN: <https://elibrary.ru/cfaqtr>

УДК 658.274

Оригинальная статья / Original article

Прототип беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land

М. В. Чугунов✉, И. Н. Полунина, А. Ю. Овчинников*Национальный исследовательский**Мордовский государственный университет,**г. Саранск, Российская Федерация*✉ m.v.chugunov@mail.ru

Аннотация

Введение. Современное электромобилестроение активно развивается по многим направлениям. Разработка и реализация проектного решения для электромобиля являются актуальными задачами, включающими в себя множество частных взаимосвязанных исследовательских, конструкторских и технологических задач. В данной статье рассматривается прототип электромобиля, реализующий проектное решение, основанное на комбинированном управлении, включающем в себя ручное, дистанционное и программное управление. **Цель исследования.** Разработать и реализовать проектное решение для прототипа электромобиля с системой комбинированного управления в ручном, дистанционном (по радио) и беспилотном режимах с возможностью для пилота легко и безопасно менять режим управления.

Материалы и методы. В качестве методов и инструментов решения поставленной задачи используются современные методы моделирования и проектирования, основанные на интегрированном подходе, предполагающем разработку виртуальных (CAx) и натуральных моделей, построенных на базе конструктора Bigo.Land и ArduPilot.

Результаты исследования. Результатом исследования является интегрированная модель прототипа электромобиля в целом и, в частности, натурная модель, CAx-модели, система управления, обеспечивающая комбинированное дистанционное, программное и ручное управление. Компоненты (натурные и виртуальные) интегрированного объекта связаны этой же системой управления.

Обсуждение и заключение. Разработанная интегрированная программно-аппаратная модель прототипа электромобиля, система траекторного управления и результаты анализа этой модели обеспечивают функционал комбинированной системы управления электромобилем и могут быть использованы разработчиками и производителями данного вида техники.

Ключевые слова: электромобиль, CAD/CAE (CAx), автономизация мобильной техники, натурные и виртуальные модели, комбинированное управление, обгонная муфта двуправленного действия, прототипирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: публикация осуществляется в рамках проекта «Разработка САПР и анализ проектных решений», реализуемого победителем грантового конкурса для преподавателей 2023/2024 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

© Чугунов М. В., Полунина И. Н., Овчинников А. Ю., 2025



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

Благодарности: авторы благодарят анонимных рецензентов и фонд Владимира Потанина, поддержавший данный проект.

Для цитирования: Чугунов М.В., Полунина И.Н., Овчинников А.Ю. Прототип беспилотного электромобиля на базе конструктора Bigo.Land. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):186–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.186-203>

Prototype of an Electric Vehicle Based on Bigo.Land

M. V. Chugunov✉, I. N. Polunina, A. Yu. Ovchinnikov

National Research Mordovia State University,

Saransk, Russian Federation

✉ m.v.chugunov@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern electric vehicle industry is actively developing in many areas. Developing design and implementing a design decision for an electric vehicle are urgent tasks, including many specific interconnected research, design and technological problems. This article discusses a prototype electric vehicle, in which there is implemented a design decision based on combined control, which includes manual, remote and program control.

Aim of the Study. The study is aimed at developing and implementing a design decision for an electric vehicle prototype with a combined control system in manual, remote (by radio) and unmanned mode that allows the pilot to easily and safely change the control mode.

Materials and Methods. To solve the problem, there were used modern modeling and design methods based on an integrated approach involving the development of virtual (CAx) and full-scale models based on the Bigo.Land constructor and ArduPilot.

Results. The result of the study is an integrated model of an electric vehicle prototype in general and, in particular, a full-scale model, CAx models, a control system providing combined remote, software and manual control. The components (full-scale and virtual) of the integrated object are connected by the same control system.

Discussion and Conclusion. The developed integrated software and hardware model of an electric vehicle prototype, trajectory control system and the results of this model analysis provide the functional of a combined electric vehicle control system and can be used by designers and manufacturers of this type of machinery.

Keywords: electric vehicle, CAD/CAE, autonomous mobile machinery, full-scale and virtual models, combined control, overrunning clutch portion, prototyping

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

Funding: The publication is carried out within the framework of the project “CAD development and analysis of design solutions”, implemented by the winner of the grant competition for teachers 2023/2024 of the Vladimir Potanin Scholarship Program.

Acknowledgements: The authors thank the anonymous reviewers, and also express their gratitude to the Vladimir Potanin Foundation, which supported this project.

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Ovchinnikov A.Yu. Prototype of an Electric Vehicle Based on Bigo.Land. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):186–203. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.186-203>

Введение. Разработка и реализация проектного решения для электромобиля является сложной междисциплинарной задачей, включающей в себя множество частных взаимосвязанных исследовательских, конструкторских и технологических задач. В связи с этим особое значение приобретает разработка прототипа электромобиля, позволяющая в условиях ограниченных ресурсов создать и реализовать

некое концептуальное проектное решение, а на его основе – решить одну или несколько частных инженерных задач. Таким образом, разрабатываемый прототип в рамках своей концепции предусматривает акцент на какую-то одну или несколько из своих многочисленных функций, реализуемых, в частности, электрическими роботизированными транспортными средствами и широко используемыми в промышленном и агропромышленном комплексах (например, в системах параллельного вождения «подруливание»).

При этом ключевым моментом является выбор платформы для реализации проекта, в качестве которой в данной работе был использован конструктор Bigo.Land. Платформа позволяет реализовать проект с самого начала, при этом обеспечивает многовариантность конструирования и проектирования.

Одной из частных инженерных задач является реализация функции комбинированного управления, сочетающая в себе дистанционное (по радиоканалу), программное и ручное управление. Дистанционное и программное управление для краткости и во избежание путаницы с терминологией ArduPolot будем называть телематическим. В случае нештатных ситуаций, когда у пилота возникает необходимость взять управление на себя, или же в случае, когда по той или иной причине пилот решает изменить программную траекторию движения – указанная функция является необходимой.

В данной работе рассматриваются бюджетные варианты реализации системы управления электромобилем, которые удовлетворяли бы всем техническим требованиям проекта в целом.

Целью исследования является разработка прототипа электромобиля, обладающего указанным функционалом комбинированного управления, под которым мы понимаем возможность простого и безопасного переключения пилотом режимов управления с ручного на телематический и обратно.

Обзор литературы. Перспективы развития электромобилестроения широко обсуждаются в литературе в экономическом [1], техническом [2] и экологическом аспектах [3; 4].

В ряду технических проблем прототипирования особое место занимает рассмотрение вопросов, связанных с информационными технологиями, используемыми для управления электромобилем, его автопилотированием и функциями автономного поведения [5–7]. Наиболее близкими к нашему исследованию являются те работы, которые рассматривают задачи прототипирования электромобиля, в частности, проекты, выполненные по программе инженерного соревнования Formula Student Russia¹.

Одной из частных инженерных задач, решаемых в рамках данного проекта, является реализация комбинированного (ручного, дистанционного, программного) управления. Среди подходов к решению этой задачи рассмотрим те из них, которые используют только механические системы без электронных компонент.

Как правило, в этом случае предлагается использовать роликовые или зубчатые (планетарные) муфты, предусматривающие два варианта работы. Первый вариант в основном используется в схватах роботов андроида типа и обеспечивает передачу

¹ Международный образовательный проект «Формула студент» [Электронный ресурс] : сайт. URL: <http://fstudent.ru/> (дата обращения: 23.09.2024); Студенческие инженерные проекты : сборник материалов и докладов 6-го Всероссийского форума. М. : Мир науки, 2020. URL: <https://izd-mn.com/PDF/50MNNPK20.pdf> (дата обращения: 23.09.2024).

крутящего момента от входного вала к выходному, а также блокировку выходного вала (самоторможение) при необходимости. Второй вариант (как в нашем случае) предусматривает суммирование углов поворота двух входных валов на выходном валу.

В кинематической схеме механизма, обеспечивающего второй вариант работы, необходимо предусмотреть дополнительную вращательную степень свободы для детали, которая в первом варианте фиксируется. В остальном принципиальная разница между этими механизмами отсутствует.

Так, в исследование [8] был предложен механизм двунаправленного действия с использованием планетарного зубчатого зацепления, обеспечивающий малую потерю мощности и малый люфт по сравнению с муфтой роликового типа и при высокой скорости вращения.

В работах [9; 10] приведены проекты муфт роликового типа, ориентированные на первый вариант работы, представлен их подробный кинематический, статический и динамический анализ, даны рекомендации по поводу назначения размеров конструктивных элементов.

Анализ обгонных муфт сопряжен со значительными трудностями и предусматривает моделирование контактного взаимодействия твердых деформируемых тел с учетом сил трения. Авторами исследования [11] представлен усовершенствованный метод анализа фрикционных контактов в муфтах свободного хода, позволяющий оценить возможность проскальзывания в контакте и потери сцепления в зависимости от сценария использования муфты. В работе [12] выполнен анализ энергоэффективности муфты при значительных нагрузках.

Сложность задачи предполагает широкий арсенал средств и инструментов анализа конструкции. Например, ANSYS используется в исследованиях [9; 10], инструменты ADAMS/SOLVER SUBROUTINE – в статье [13], SIMULINK – в работе [14].

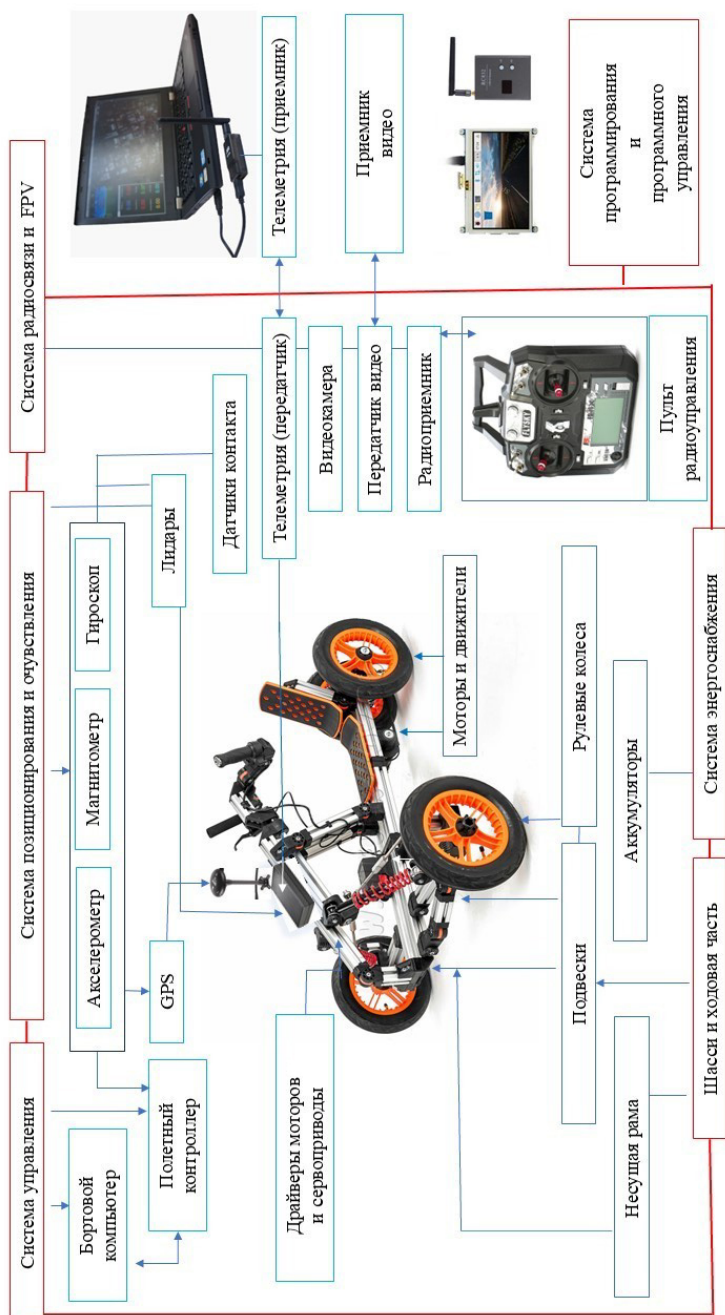
В целом, представленное нами исследование продолжает опыт авторов по разработке беспилотных мобильных систем на базе ArduPilot/APM/Pixhawk [15–18].

Материалы и методы. Архитектура прототипа электромобиля в общем виде представлена на рисунке 1 и включает в себя следующие компоненты и системы: шасси и ходовую часть; электродвигатель (как правило, более одного); системы энергоснабжения, управления, радиосвязи (FPV), позиционирования и осязательства, программирования и программного управления.

Управление движением электромобиля (мобильного колесного робота) осуществляется по классической схеме (рис. 1) с двумя приводными (задними) колесами и двумя рулевыми (передними) колесами. Механизм поворота обеспечивает принцип управления Аккермана [19] и включает в себя вал руля, маятник, установленный на валу руля и осуществляющий поворот рулевой трапеции. В случае программного и дистанционного управления конструкция дополняется сервоприводом. Таким образом, согласно классификации [20] рассматриваемый робот относится к типу 4X2K2Py.

В программно-аппаратную часть системы управления², построенную на базе ArduPilot и используемую нами в работах [16–18], внесли некоторые изменения.

² Программно-аппаратное решение для мобильной роботизированной платформы / И. А. Лакоткин [и др.] // L. Огарёвские чтения : материалы Всеросс. с междунар. участием науч. конф. 3 ч. (6 ноября – 11 декабря 2021 г., г. Саранск). Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, 2022. Ч. 1. С. 774–779. <https://elibrary.ru/hacxjs>



Р и с. 1. Архитектура электромобиля

Источник: рисунки 1, 11 составлены авторами статьи.

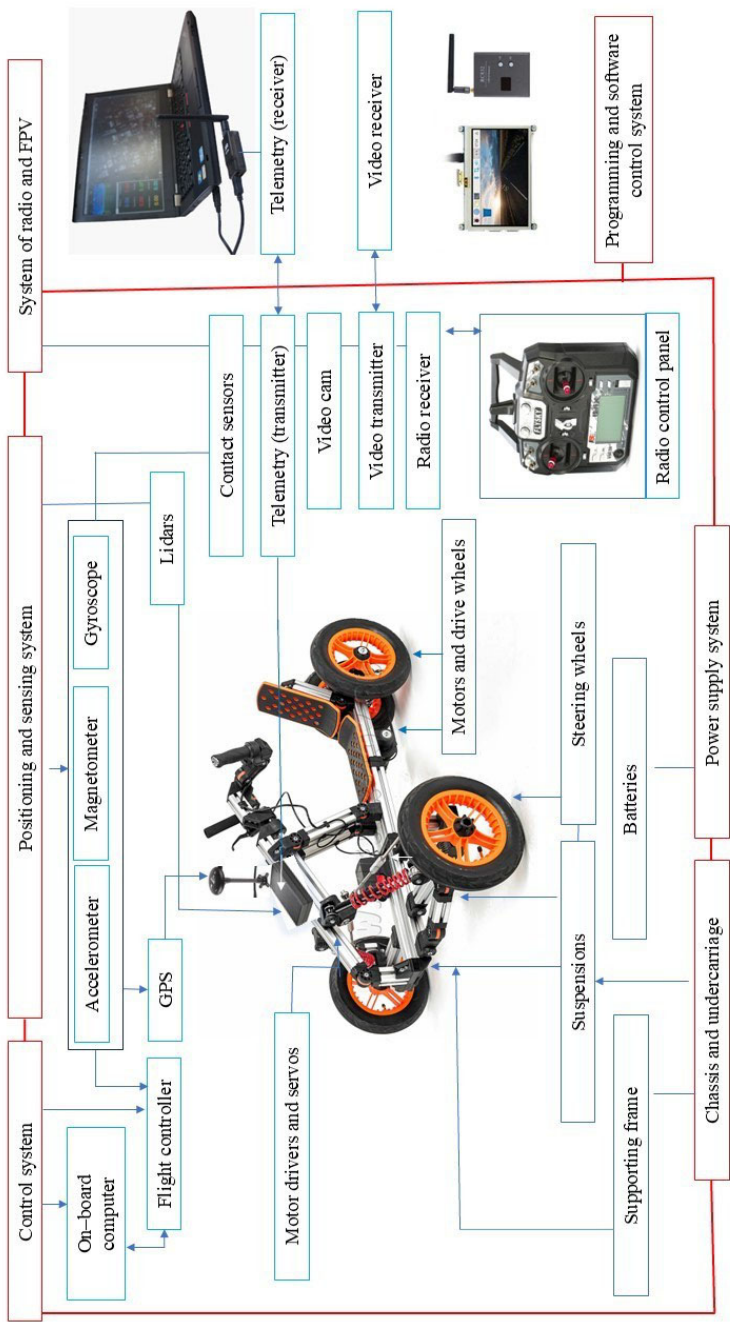


Fig. 1. Electric vehicle architecture

Source: figures 1, 11 are made by the authors of the article.

Штатный вариант ArduPilot (ArduRover) предусматривает использование ШИМ-сигнала в качестве управляющего для драйвера мотора, а драйвер Bigo.Land в качестве управляющего использует аналоговый сигнал, получаемый непосредственно от ручки газа (с использованием датчика Холла). В этой связи необходимо между соответствующим портом Pixhawk, передающим управляющий ШИМ-сигнал, и драйвером мотора установить настраиваемый конвертер, преобразующий ШИМ в аналоговый сигнал, соответствующий по диапазону изменения напряжения штатным значениям Bigo.Land. Во всем остальном программно-аппаратная часть системы управления совпадает с представленной в работах [15–18].

Виртуальная САх-модель электромобиля разработана в соответствии с конструктивными особенностями Bigo.Land в параметрической форме, при этом глобальными переменными являются основные геометрические параметры шасси: L (колесная база) и H (размер колес) [15]. Видеоролик³ иллюстрирует основные параметрические свойства модели, а также процесс тестирования прототипа электромобиля как в натурном, так и виртуальном вариантах в различных режимах управления.

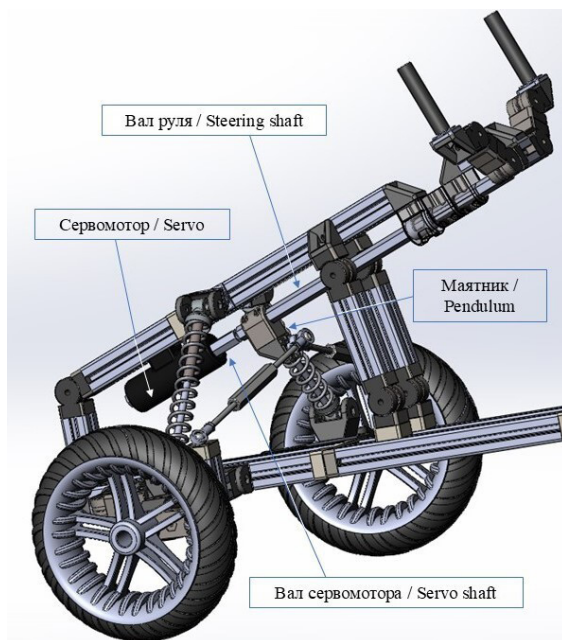
Основным инструментом интеграции виртуальной и натурной модели является единая система траекторного управления и путевой стабилизации [15–18]. К сожалению, для виртуальной модели в виде САх реализовать процесс управления синхронно в реальном времени не удастся в виду вычислительной трудоемкости САх-модели. Средства имитационного моделирования, включенные в состав наземных станций управления (например, ArduPilot SITL, Mission Planner⁴), позволяют синхронизировать управление натурной виртуальной модели и модели, созданной в среде MissionPlanner. При этом необходимо обеспечить комбинированное дистанционное (программное) и ручное управление. Это означает, что поворот вала руля, соединенного с рулевой трапецией, должен совершаться в дополнение к повороту вала сервомотора, реализующему функции автопилотирования. Иными словами, необходимо дополнительное устройство, установленное между валом сервомотора и валом руля, обеспечивающее функцию «подруливания» со стороны пилота (рис. 2). Необходимость такой функции очевидна и связана прежде всего со всякого рода нештатными ситуациями, в которых автопилот не в состоянии справиться, и требуется вмешательство пилота.

Указанную задачу можно решить, используя обгонную муфту двустороннего действия. На рисунке 3 приведена сборка обгонной муфты, которая включает в себя полумуфту и вал рулевой трапеции, полумуфту и вал сервомотора, ролики, пружины роликов, подшипники, а также вал руля с кулачками. На рисунке 4 показана установка обгонной муфты на актуальную для решения этой задачи часть всей конструкции электромобиля. Видеоролик иллюстрирует сборку муфты⁵.

³ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/smFo/Ygfm7ecce>

⁴ SITL Simulator (Software in the Loop) [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html> (дата обращения: 23.09.2024).

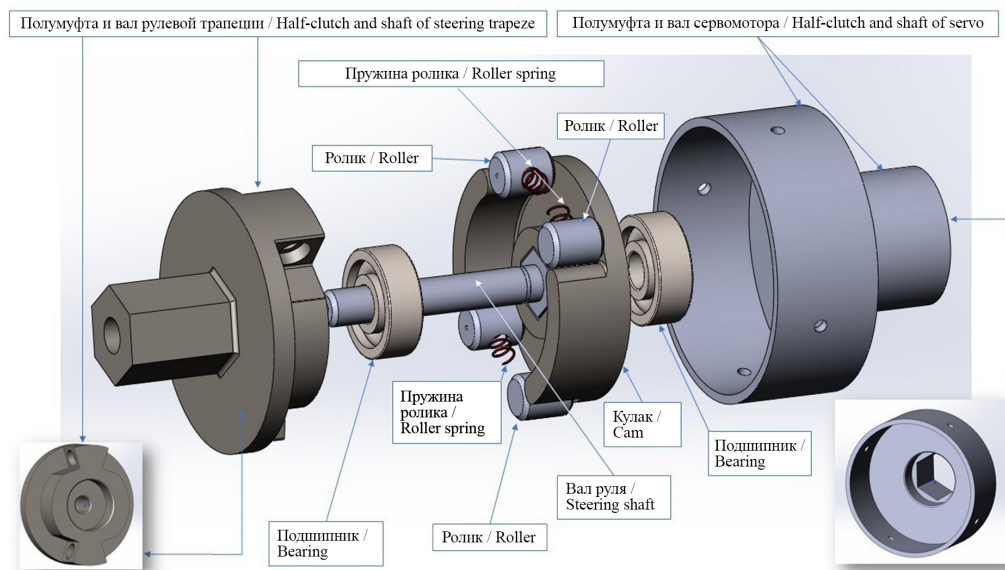
⁵ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/mgXo/FfbBQtV5z>



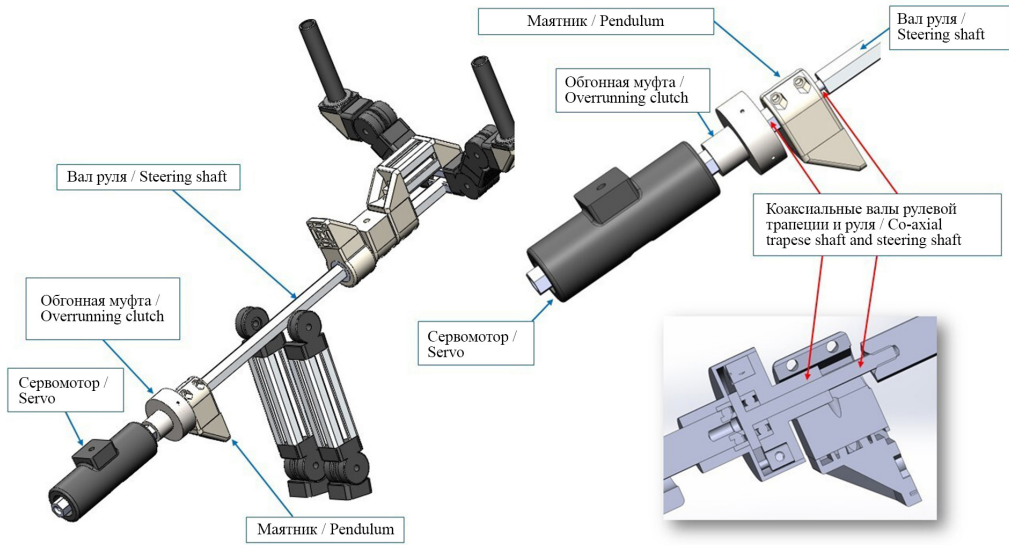
Р и с. 2. Система управления движением
F i g. 2. Motion control system

Источник: модели для рисунков 2–10 построены в САХ-системе SolidWorks.

Source: models for figures 2–10 are created with the use of the CAx-SolidWorks.



Р и с. 3. Сборка обгонной муфты
F i g. 3. Overrunning clutch portion assembly



Р и с. 4. Обгонная муфта в контексте сборки всей конструкции

Fig. 4. Overrunning clutch in the context of the assembly of the complete structure

Круглый вал руля от муфты и шестигранный вал рулевой трапеции с цилиндрическим отверстием расположены относительно друг друга коаксиально. При повороте рулевых колес в ручном режиме управления силы трения колес о контактируемую поверхность тормозят поворот полумуфты и вала рулевой трапеции, что обеспечивает разблокирование этого вала с полумуфтой и валом сервомотора.

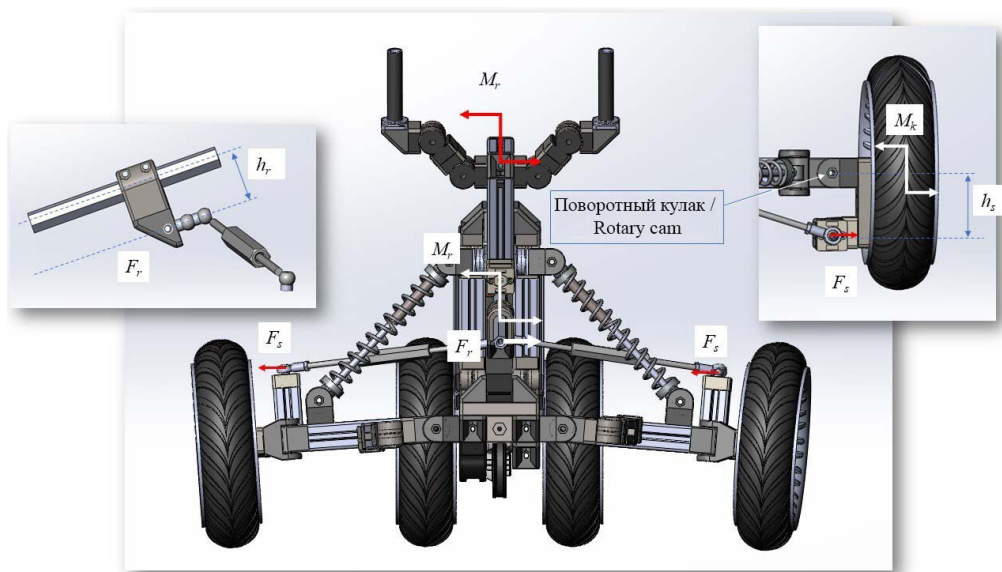
В результате пилот получает возможность управлять электромобилем при фиксированном положении вала сервомотора, заданного автопилотом. В свободном состоянии руля пружины выталкивают ролики, механизм блокируется от взаимного поворота полумуфт, и сервомотор поворачивает вал рулевой трапеции вместе с валом руля на угол, заданный автопилотом.

Функциональность обгонной муфты обеспечивается множеством параметров. Среди них основными являются геометрические и массово-инерционные параметры деталей, а также жесткости пружин. Кроме того, помимо заданных габаритов, необходимо обеспечить передачу крутящего момента, достаточного для поворота рулевых колес.

Для определения необходимых крутящих моментов следует определить момент M_k на поворотном кулаке передней подвески и, соответственно, момент M_r на валу руля в состоянии покоя (рис. 5). Из условий статического равновесия

$$M_r = F_r h_r = 2F_s h_s = 2M_k,$$

где F_r и F_s – силы, создающие момент на маятнике и рулевой тяге, а h_r и h_s – плечи этих сил для моментов M_r и M_k соответственно.



Р и с. 5. Крутящий момент на руле
F i g. 5. Steering wheel torque

Примечание: M_k – момент на поворотном кулаке передней подвески; M_r – момент на валу руля; F_r и F_s – силы, создающие момент на маятнике и рулевой тяге; h_r и h_s – плечи этих сил для моментов M_r и M_k соответственно.

Note: M_k – the torque on the steering cam of the front suspension; M_r – the torque on the steering shaft; F_r and F_s are the forces creating the moment on the pendulum and steering rod; h_r and h_s are the arms of these forces for the moments M_r and M_k , respectively.

Для определения момента на поворотном кулаке предлагается упрощенная модель, включающая в себя колесо, смонтированное на оси и несущей вилке (рис. 6).

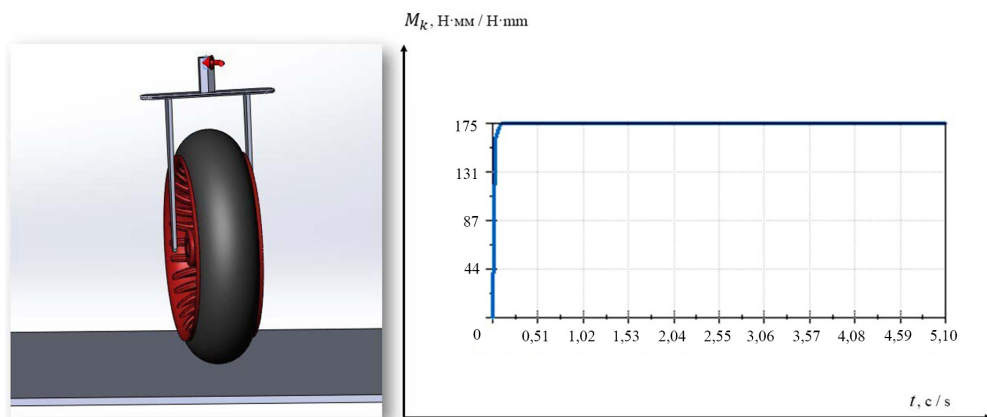
Крутящий момент на валу вилки колеса может быть определен согласно известному соотношению [21]:

$$M_k = \int_0^{2\pi} \int_0^R \mu p r^2 dr d\varphi = \int_0^{2\pi} \frac{\mu p R^3}{3} d\varphi = \frac{2\pi}{3} \mu p R^3 = 0,178743 \text{ Н} \cdot \text{м} = 178,7 \text{ Н} \cdot \text{мм},$$

где $\mu = 0,8$ (коэффициент трения покоя); $p = 1,5 \text{ атм} = 151\,988 \text{ Па}$ (давление в шине); $R = 0,08885 \text{ м}$ (радиус пятна контакта шины с поверхностью парковки).

Таким образом, требуемая величина $M_r^0 = 358 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

Результат численного эксперимента с использованием модели SolidWorks Motion (рис. 6) дает для искомой величины $M_k^{sw} = 175 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

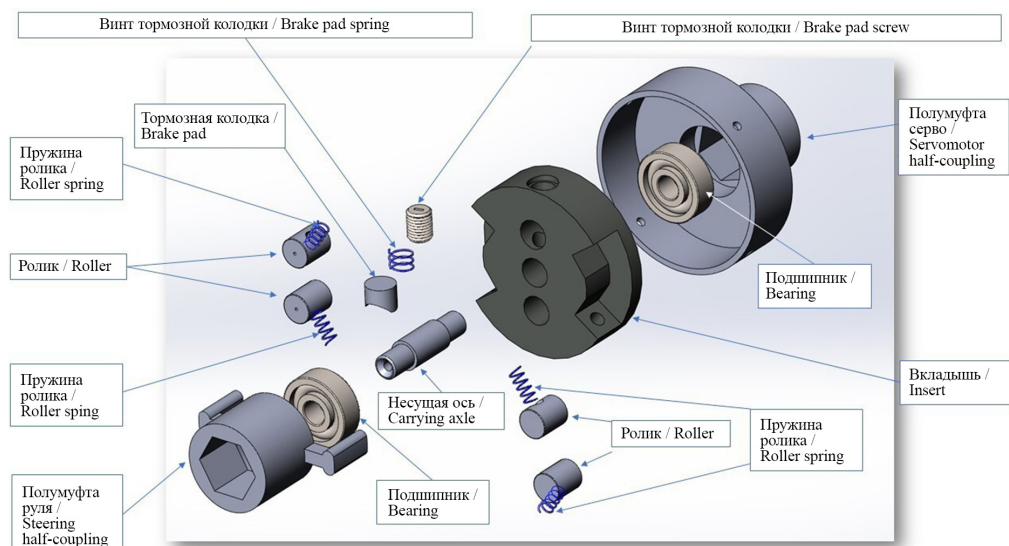


Р и с. 6. Крутящий момент на поворотном кулаке (вилке)

Fig. 6. The rotary cam torque

Для определения необходимых параметров механизма разработана аналогичная представленной на рисунке 3 модель, позволяющая проводить численные эксперименты независимо от модели всей системы управления, включающей в себя колеса, подвески, рулевую трапецию и т. д. Исследование такой громоздкой модели требует существенных вычислительных затрат.

Рассматриваемая модель (рис. 7) дополнена несущей осью, тормозной колодкой, пружиной и винтом тормозной колодки. Силы трения тормозной колодки о поверхность несущей оси определяются силой сжатия пружины тормозной колодки. Соответствующий момент трения относительно оси вращения аналогичен тому самому «полезному» моменту M_r , передаваемому от полумуфты рулевой трапеции на вал рулевой трапеции.



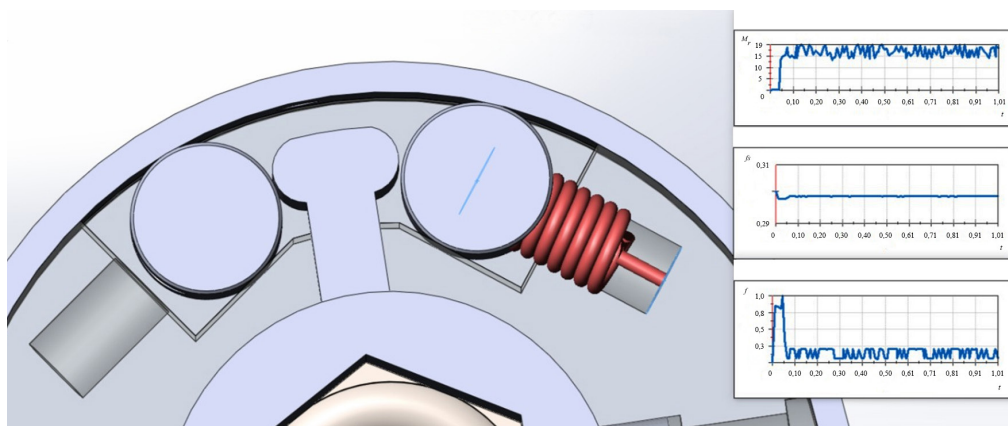
Р и с. 7. Сборка обгонной муфты

Fig. 7. Overrunning clutch assembly

Результаты исследования. Для определения необходимой жесткости пружин при заданной силе прижима тормозной колодки была проведена серия численных экспериментов. Если крутящий момент приложен на валу серво, то вал руля фиксируется. И наоборот: если момент приложен на валу руля, то вал серво фиксирован. Первую задачу будем условно называть прямой, вторую – обратной.

Рисунок 8 иллюстрирует механизм разблокирования муфты при очень малой ($k = 0,05 \text{ Н} \cdot \text{мм}$) жесткости пружин роликов. При этом сила прижима тормозной колодки задана значением $P = 0$. В этом случае функция разблокирования обеспечивается только инерционными свойствами вкладыша, поскольку трение во вращательной кинематической паре «ось несущая – вкладыш» в рамках данной модели также не учитывается, и сопряжение работает как идеальный подшипник скольжения.

При возрастании крутящего момента (первый сверху график на рисунке 8) происходит разблокировка муфты, и сила трения в кинематической паре «ролик – обойма полумуфты серво» быстро уменьшается (третий сверху график). На рисунке 8 приведен также график (второй сверху) зависимости от времени силы упругого сжатия пружины ролика. Вначале эта сила увеличивается, затем значение ее стабилизируется. В целом механизм разблокирования муфты показан в видеоролике⁶. Величина внешнего крутящего момента, соответствующая установившемуся движению, составляет $18 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.



Р и с. 8. Механизм разблокирования муфты

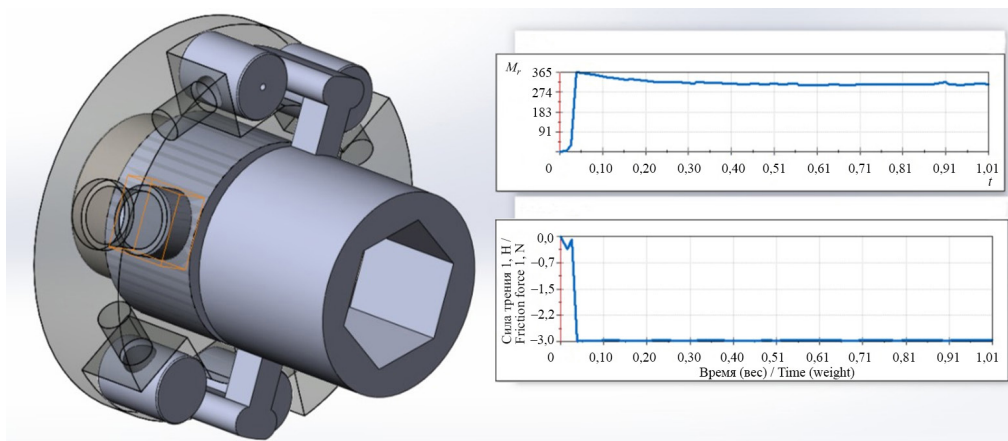
Fig. 8. Clutch release mechanism

В рассматриваемых условиях, то есть при малых значениях жесткости пружин роликов, функция разблокирования наблюдается явным образом. Однако при решении обратной задачи, то есть при фиксации вала руля и нагружении внешним крутящим моментом вала сервомотора, можно наблюдать слишком малую величину момента трения покоя, которая значительно меньше ранее определенного нами момента $M_r^0 = 358 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, необходимого для поворота рулевых колес. Так,

⁶ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/vYzM/dJYeQxoY6>

в рассматриваемом случае ($k = 0,05 \text{ Н} \cdot \text{мм}$) величина крутящего момента трения, соответствующая переходу от статического трения к кинематическому, составила всего лишь $79 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

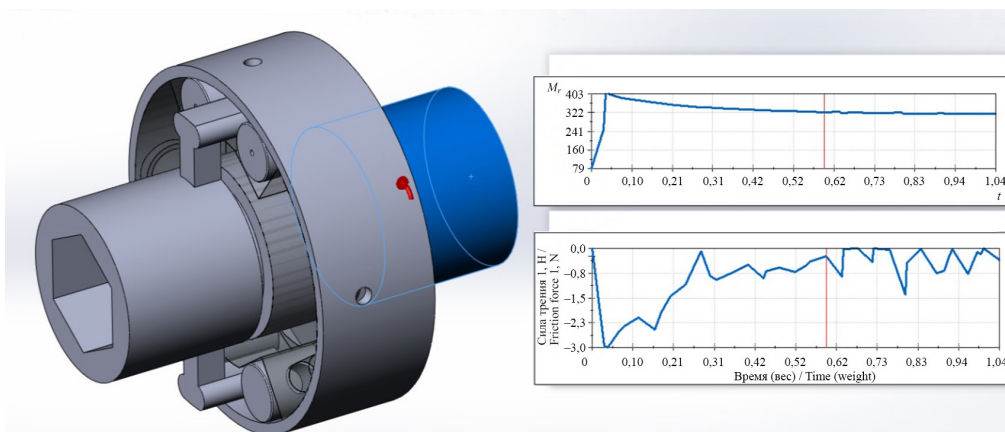
Требуемый функционал муфты в рамках данной модели может быть обеспечен увеличением жесткости пружин роликов k и силы прижима тормозной колодки. При достаточно высоком значении момента трения в кинематической паре «вкладыш – несущая ось» будет обеспечено требуемое торможение вкладыша в начальном моменте движения и, как следствие, деформация пружин роликов с последующим разблокированием муфты. Так, при $k = 1,00 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ и силы прижима колодки $P = 10 \text{ Н}$ наблюдаем надежное разблокирование муфты в начальный момент движения и с моментом $310 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ при установившемся движении (рис. 9). На рисунке 9 аналогично случаю, представленному на рисунке 8, при возрастании крутящего момента (первый сверху график на рисунке 9) происходит разблокировка муфты, и сила трения в кинематической паре «ролик – обойма полумуфты серво» быстро уменьшается (второй сверху график).



Р и с. 9. Крутящий момент приложен к валу руля

F i g. 9. The torque is applied to the steering shaft

Рисунок 10 иллюстрирует решение обратной задачи. При этом крутящий момент, приложенный к валу сервомотора, достигает в статическом состоянии величины $403 \text{ Н} \cdot \text{мм}$. Для получения «полезного» значения момента M_r , реализуемого сервомотором, необходимо вычесть из найденного значения величину момента трения, обусловленного прижимом тормозной колодки. На графике (первый сверху) это значение соответствует точке с абсциссой $t = 0$. Итак, в нашем случае полезная величина $M_r = 403 - 79 = 324 \text{ Н} \cdot \text{мм}$. На рисунке 10 приведена также зависимость от времени силы трения в кинематической паре «ролик – обойма полумуфты серво» (второй график сверху), которая быстро достигает максимальной величины, соответствующей силе трения покоя в начальной стадии движения.



Р и с. 10. Крутящий момент приложен к валу сервомотора

F i g. 10. The torque is applied to the shaft of the servo motor

Для пары значений $k = 2 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ и $P = 10 \text{ Н}$ аналогичная разность для крутящего момента составила $M_r = 500 - 79 = 421 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, что больше M_r^0 и, таким образом, удовлетворяет заданным требованиям для поворота рулевых колес.

Проведенная серия численных экспериментов позволила исследовать качественные особенности механизма и сделать приблизительные оценки для параметров, задаваемых количественно.

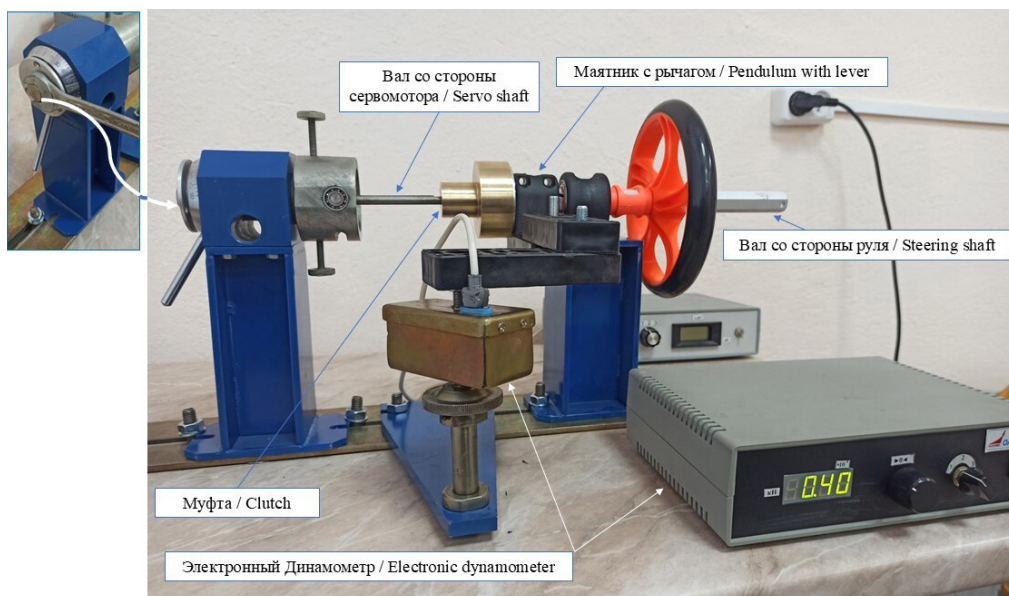
Для испытания обгонной муфты в ее натурном исполнении был собран экспериментальный стенд (рис. 11). Стенд включает в себя обгонную муфту, вал со стороны сервомотора, вал со стороны руля, маятник с рычагом (в рулевом механизме он предназначен для поворота рулевой трапеции и рулевых колес), электронный динамометр.

Назначение стенда состоит в тестировании основной функции муфты – комбинированного управления, непосредственно связанного с блокировкой и разблокировкой муфты. Этот функционал уже был протестирован нами на виртуальной модели в процессе решения двух задач: прямой и обратной.

В процессе натурального эксперимента для прямой задачи вал сервомотора освобождается и, таким образом, свободно поворачивает как маятник, так и вал руля. Этот вариант работы муфты соответствует телематическому режиму управления. При этом динамометр фиксирует крутящий момент, передаваемый на рулевую трапецию.

В процессе натурального эксперимента для прямой задачи вал сервомотора фиксируется ключом (рис. 11). Это состояние соответствует фиксированному валу сервомотора при телематическом управлении. При этом вал руля свободно поворачивает маятник с рычагом, а динамометр фиксирует передаваемый на рулевую трапецию крутящий момент аналогично предыдущему эксперименту.

Полученные численные значения свидетельствуют о том, что передаваемый муфтой крутящий момент как в первом (ручном), так и во втором (телематическом) режимах управления в пересчете к требуемой величине крутящего момента $M_r^0 = 358 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, соответствует заданному необходимому значению этого момента.



Р и с. 11. Экспериментальный стенд для испытания обгонной муфты

F i g. 11. Experimental bench for overrunning clutch test

Процедуру тестирования электромобиля как в натурном, так и в виртуальном исполнении иллюстрирует видеоролик⁷.

Обсуждение и заключение. Разработана интегрированная натурная и САх-модель прототипа электромобиля с комбинированным ручным и программным (дистанционным) управлением.

Обгонная муфта двунаправленного действия, установленная между валом сервомотора и валом руля, обеспечивает функцию «подруливания» со стороны пилота наряду с дистанционным (программным) управлением.

Проведенные численные эксперименты с САх-моделью и натурные эксперименты подтверждают работоспособность муфты и системы управления в целом.

Проект представляет собой законченную разработку, выполненную на базе принципов системного инжиниринга, позволяющего объект проектирования и все его подсистемы рассматривать как единое целое и в конструкторском, и в функциональном аспектах. Параметрические свойства разработанных САх-моделей обеспечивают возможность масштабирования и адаптации проекта для решения широкого круга практических задач проектирования конструкций данного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Афанасьев А.Н., Сазонов М.В. Перспективы развития электротранспорта. *Символ науки*. 2020;(12-1):29–31. URL: <https://os-russia.com/SBORNIKI/SN-2020-12-1.pdf> (дата обращения: 23.09.2024).

⁷ Видеоролик размещен на <https://cloud.mail.ru/public/smFo/Ygfm7ecce>

- Afanasyev A.N., Sazomov M.V. [Prospects for the Development of Electric Transport]. *Simvol Nauki*. 2020;(12-1):29–31. (In Russ.) Available at: <https://os-russia.com/SBORNIKI/SN-2020-12-1.pdf> (accessed 23.09.2024).
2. Мубаракшина Р.Р. Валеева Ю.С. Аналитика развития рынка электротранспорта в России. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Экономика и управление*. 2022;53(1):57–65. <https://doi.org/10.25686/2306-2800.2022.1.57>
Mubarakshina R.R., Valeeva Yu.S. Market Development Analysis Electric Transport in Russia. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Economics and Management*. 2022;53(1):57–65. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25686/2306-2800.2022.1.57>
 3. Малышев В.П., Русскова И.Г. Электромобили в РФ: за и против. *Вестник МАНЭБ*. 2023;28(3):23–26. <https://www.elibrary.ru/sdidthp>
Malyshev V.P., Russkova I.G. Electric Vehicles in the Russian Federation: Pro and Contra. *Vestnik IAELPS*. 2023;28(3):23–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/sdidthp>
 4. Левицкий Е.Н., Зеленина А.Н., Львович И.Я. Влияние производства и эксплуатации электромобилей на экологию. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2023;46(3):6–7. <https://www.elibrary.ru/atnxtl>
Levitskiy E.N., Zelenina A.N., Lvovich I.Ya. The Impact of the Production and Operation of Electric Vehicles on the Environment. *Vestnik Voronezhskogo Instituta Vysokih Tekhnologij*. 2023;46(3):6–7. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/atnxtl>
 5. Macharia V.M., Garg V.K., Kumar D. A Review of Electric Vehicle Technology: Architectures, Battery Technology and its Management System, Relevant Standards, Application of Artificial Intelligence, Cyber Security, and Interoperability Challenges. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2023:e12083. <https://doi.org/10.1049/els2.12083>
 6. Buechel M., Frtunikj J., Becker K., Sommer S., Buckl C., Armbruster M., et al. An Automated Electric Vehicle Prototype Showing New Trends in Automotive Architectures. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2015:1274–1279. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.209>
 7. Hubert M.A., Valdiero A.C., Goergen R., Stein E., Regner R.R., Maciel B.-H. Low-Cost Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Project for Autonomous Electric Vehicle Prototype. *Proceedings of IDEAS 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2020;198:416–424. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55374-6_41
 8. Waragai M., Takayama T. Development of a High-Speed and Low-Torque Loss Two-Way Clutch. *Robomech Journal*. 2022;9:21. <https://doi.org/10.1186/s40648-022-00236-6>
 9. Controzzi M., Cipriani C., Carrozza M.C. Miniaturized Non-Back-Drivable Mechanism for Robotic Applications. *Mechanism and Machine Theory*. 2010;45(10):1395–1406. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2010.05.008>
 10. Controzzi M., Luciani L.B., Montagnani F. Unified Approach to Bi-Directional Non-Back Drivable Roller Clutch Design. *Mechanism and Machine Theory*. 2017;116:433–450. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.06.010>
 11. Nagler N., Lohrengel A. Improved Design Criterion for Frictionally Engaged Contacts in Overrunning Clutches. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2021;85:1053–1063. <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00496-5>
 12. Siedel T., Lukac D., Geppert T., Benckendorff C., Hild M. Operating Characteristics of a Passive, Bidirectional Overrunning Clutch for Rotary Joints of Robots. *XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*. 2011. <https://doi.org/10.1109/ICAT.2011.6102087>
 13. Imran M.N., Baharom M.B. Simplified Modelling Method to Predict Output Speed of an Overrunning Clutch Using ADAMS/Solver Subroutine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(22):13038–13041. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1116_5343.pdf (accessed 23.09.2024).

14. Zhao H., Wang B., Zhang G., Li J. Concept of a New Overrunning Clutch with the Characteristic of Reverse Force Transfer at High Speed. *Engineering Reports*. 2021;3(11):e12415. <https://doi.org/10.1002/eng2.12415>
15. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Дивин А.Г., Генералова А.А., Никулин А.А., Бычков Д.С. Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы. *Инженерные технологии и системы*. 2021;31(4):609–627. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Divin A.G., Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S. Integrated Mobile Robotic Platform Model. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):609–627. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-627>
16. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Ермишов И.А. Интегрированные модели транспортной платформы мобильного робота. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(11):528–534. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-11-528-529>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Ermishov I.A. Integrated Models of Mobile Robot Transport Platform. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*. 2023;(11):528–534. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-11-528-529>
17. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Ермишов И.А. Программное обеспечение для траекторного управления виртуальным мобильным роботом на базе Ardupilot. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022;(8):386–389. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-386-390>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Ermishov I.A. Ardupilot-Based Virtual Mobile Robot Trajectory Control Software. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*. 2022;(8):386–389. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-386-390>
18. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Пьянзин А.М. Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(3):464–479. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479>
Chugunov M.V., Polunina I.N., Pjanzin A.M. E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):464–479. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479>
19. Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А. Кинематическое управление движением колесных транспортных средств. *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2015;25(2):254–266 <https://doi.org/10.20537/vm150210>
Berestova S.A., Misyura N.E., Mityushov E.A. Kinematic Control of Vehicle Motion. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye Nauki*. 2015;25(2):254–266. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20537/vm150210>
20. Васильев А.В. Обобщенная классификация мобильных роботов. *Экстремальная робототехника*. 2014;25(1):41–45. <https://www.elibrary.ru/wtdcyt>
Vasiliev A.V. Aspects of Mobile Robots Classification. *Extreme Robotics*. 2014;25(1):41–45. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/wtdcyt>
21. Sharp R.S., Granger R. On Car Steering Torques at Parking Speeds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2003;217(2). <https://doi.org/10.1177/095440700321700202>

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, SPIN-код: 5861-0050, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, SPIN-код: 3406-3859, my_pk@mail.ru

Овчинников Александр Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6796-1824>, ovchinnikov.alexander@rambler.ru

Вклад авторов:

М. В. Чугунов – 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, осуществление научно-исследовательского процесса, включая САХ-моделирование.

И. Н. Полунина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая САХ-моделирование; создание и подготовка рукописи, включая его перевод на иностранный язык; визуализация результатов исследования.

А. Ю. Овчинников – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение натурных экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 02.12.2024; поступила после рецензирования 18.12.2024;
принята к публикации 27.12.2024*

About the authors:

Mikhail V. Chugunov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Chair of Design and Technology Informatics, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, Researcher ID: H-7452-2018, SPIN-code: 5861-0050, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Cand.Sci. (Ped.), Associate Professor of Chair of Design and Technology Informatics, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, SPIN-code: 3406-3859, my_pk@mail.ru

Alexander Yu. Ovchinnikov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6796-1824>, ovchinnikov.alexander@rambler.ru

Authors contribution:

M. V. Chugunov – formulating the idea, goals and objectives of the study; preparing the manuscript: critical analysis of the manuscript draft and comments and of the corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages, carrying out of the studies including CAX modeling.

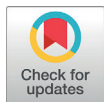
I. N. Polunina – carrying out the studies including CAX modeling; preparing the manuscript including its translation into a foreign language; visualizing the study results.

A. Yu. Ovchinnikov – carrying out the studies including the carrying out of physical experiments and collecting of data; preparing the manuscript: writing a manuscript draft.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 02.12.2024; revised 18.12.2024; accepted 27.12.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.204-224>

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

УДК 621

Оригинальная статья / Original article

Повышение производительности конических мельниц за счет использования внешних колебаний

И. С. Карцев 

Институт машиноведения имени А. А. Благонравова

Российской академии наук,

г. Москва, Российская Федерация

 johnkarcev@gmail.com

Аннотация

Введение. В условиях растущих требований к эффективности переработки зерновых культур актуальной задачей становится повышение производительности мельничного оборудования. Одной из ключевых проблем является неравномерная подача зерна в зону размола. Предлагается использование внешних колебаний, совпадающих с резонансной частотой зерна, для повышения равномерности подачи и ориентации зерен, что может сократить время обработки.

Цель исследования. Определить влияние внешнего колебательного воздействия на динамику движения и ориентацию зерна ячменя при подаче в конические мельницы для повышения производительности и энергоэффективности процесса размола.

Материалы и методы. Для получения необходимых для расчета данных проводилось численное моделирование, модальный анализ в ANSYS, определение собственных частот колебаний зерна ячменя.

Результаты исследования. Проведено теоретическое обоснование. Выведены уравнения движения зерна по колеблющейся поверхности загрузочного бункера, рассчитана средняя скорость движения зерна ячменя с учетом внешнего колебательного воздействия. Выполнена экспериментальная проверка: лабораторная установка с вибромотором и измерительной системой. Проведено сравнение времени размола зерна с включением и без включения внешнего колебательного воздействия. Моделирование показало, что при воздействии колебаний с частотой 4 394 Гц средняя скорость движения зерна возрастает с 0,70 до 0,96 м/с (рост на 27 %). Эксперимент подтвердил снижение времени размола партии зерна на 23,89 %. Вычислена экономия энергозатрат: снижение до 20,96 % по сравнению с режимом без внешнего колебательного воздействия.

Обсуждение и заключение. Результаты демонстрируют, что применение внешнего колебательного воздействия, синхронизированного с собственной частотой колебаний зерна, значительно повышает производительность мельниц за счет улучшенной подачи и ориентации материала. Метод доказал энергоэффективность и может быть масштабирован на промышленные установки.

Ключевые слова: коническая мельница, разمول зерна, колебательное воздействие, производительность мельниц, численное моделирование

© Карцев И. С., 2025



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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Карцев И.С. Повышение производительности конических мельниц за счет использования внешних колебаний. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(2):204–224. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.204-224>

Improving the Productivity of Conical Mills by Using External Vibrations

I. S. Kartsev 

*Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

 johnkarcev@gmail.com

Abstract

Introduction. In the context of growing demands for the grain processing efficiency, an urgent task is to increase the productivity of mill equipment. One of the key problems is the uneven feeding of grain into the milling zone. It is proposed to use external vibrations that coincide with the resonant frequency of the grain to improve the uniformity of feeding and grain orientation that can reduce the processing time.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the influence of external vibration effect on the motion dynamics and orientation of barley grain when feeding into conical mills to improve the productivity and energy efficiency of the milling process.

Materials and Methods. To obtain the data necessary for the calculation, there were carried out numerical simulation, modal analysis in ANSYS, and determination of the natural frequencies of barley grain vibrations.

Results. There have been found a theoretical justification. There have been derived the equations of grain motion along the vibrating surface of the loading hopper; there has been calculated the average speed of barley grain motion taking into account the external vibrational effect. Then, an experimental test was carried out with the use of a laboratory setup with a vibration motor and a measuring system. The grain milling time was compared with and without external vibration effect. The simulation showed that when exposed to vibration effect with a frequency of 4,394 Hz, the average grain speed increases from 0.70 to 0.96 m/s (an increase of 27%). The experiment confirmed a reduction in the grain lot milling time by 23.89%. There have been calculated the energy cost savings: a reduction of up to 20.96% compared to the mode without external vibration effect.

Discussion and Conclusion. The results demonstrate that the use of external vibration effect synchronized with the natural frequency of grain vibrations significantly increases the mill productivity due to improved feeding and orientation of the grain material. The method has proven its energy efficiency and can be used for industrial installations.

Keywords: grain milling, conical mill, vibration effect, mill performance, numerical simulation

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

For citation: Kartsev I.S. Improving the Productivity of Conical Mills by Using External Vibrations. *Engineering Technologies and Systems.* 2025;35(2):204–224. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.204-224>

Введение. В современных условиях сельскохозяйственного производства и переработки зерновых культур возрастает необходимость повышения эффективности оборудования, используемого для помола зерна ячменя. Одним из ключевых элементов таких процессов являются мельницы, производительность которых во многом определяется качеством подачи материала в размалывающую зону.

Традиционные конструкции мельниц, основанные на вращении жерновов и гравитационной подаче зерна ячменя, обладают ограниченной производительностью, связанной с нерегулярностью подачи зерна ячменя и недостаточной его ориентацией перед поступлением в рабочую зону. Эти факторы могут вызывать нестабильность процесса помола, увеличивать время обработки и снижать общий коэффициент полезного действия мельницы.

Одним из перспективных методов повышения производительности является использование колебательного воздействия на этапе подачи зерна ячменя. Предполагается, что внешние колебания, настроенные на резонансные частоты колебаний зерна ячменя, способны увеличить скорость движения по загрузочному бункеру и обеспечить более равномерное распределение материала. При этом оптимизация ориентации зерна ячменя в пространстве перед поступлением в рабочую зону способствует увеличению производительности мельницы за счет сокращения времени обработки одной партии зерна ячменя.

Целью исследования является повышение производительности мельниц с жерновами конического типа для размола зерна зерновых культур путем применения внешнего колебательного воздействия.

В соответствии с целью поставлены следующие задачи исследования:

- 1) определить собственные частоты колебаний зерна ячменя с использованием численного моделирования;
- 2) теоретически обосновать влияние внешнего колебательного воздействия на движение зерна ячменя;
- 3) экспериментально проверить и оценить влияние внешних колебательных воздействий, ориентирование зерна ячменя на производительность мельниц конического типа.

Обзор литературы. Производительность оборудования мукомольной и зерноперерабатывающей промышленности во многом определяется эффективностью подачи, ориентации и последующего размола зернового материала в рабочей зоне. Одной из причин снижения производительности мельниц конического типа является неплотность потока и хаотичная ориентация зерна, что приводит к пробкам и неравномерной нагрузке на жернова. Ориентация зерна перед входом в рабочую зону существенно влияет на качество и скорость размола, снижает сопротивление при разрушении оболочки и повышает однородность конечного продукта [1; 2].

Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной задачи является использование вибрационных систем¹, создающих внешние колебательные воздействия². В литературе³ описаны различные конструкции вибропитателей и колебательных транспортных систем, позволяющих регулировать скорость и плотность подачи сыпучих материалов. Исследования⁴ в области вибрационного

¹ Блехман И. И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения). М. : Физматлит, 2018. 751 с.; Блехман И. И. Вибрационная механика. М. : Наука, 1994. 400 с.

² Гусев А. Ф., Новоселова М. В. Прикладная теория колебаний : учебное пособие. Тверь : ТвГТУ, 2017. 160 с.

³ Клепиков С. И. Качество вибрационных транспортно-технологических устройств : моногр. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. 106 с.

⁴ Ковалёв Н. Н., Сидоров А. А. Основы вибрационного транспорта. М. : Машиностроение, 1980. 272 с.

транспорта показывают, что правильно подобранная частота колебаний может существенно повлиять на кинематические характеристики материала.

Особое внимание уделяется феномену резонансных колебаний, при котором совпадение внешней частоты возбуждения с собственной частотой колебаний элемента (в данном случае зерна ячменя) приводит к резкому увеличению амплитуды отклика. В работах зарубежных авторов [3–5] доказывается, что использование резонансных частот в вибрационных системах улучшает ориентацию частиц и способствует ускоренной подаче. Аналогичные выводы содержатся в публикациях, посвященных моделированию вибрационного движения⁵ и оптимизации подачи сыпучих материалов⁶. Кроме того, математическое моделирование процессов движения зерна по колеблющимся поверхностям, представленное в работах [6–8], дает возможность количественно оценивать влияние параметров колебаний (амплитуда, частота, фаза) на характеристики движения. Таким образом, современное состояние исследований указывает на высокую эффективность колебательных воздействий при транспортировке и переработке зерна, однако остается открытым вопрос практической реализации и настройки параметров колебаний с учетом физических свойств конкретной культуры (в данном случае ячменя) и геометрии оборудования.

Производительность оборудования мукомольной промышленности во многом зависит от времени, затрачиваемого на транспортировку и ориентацию материалов в зоне обработки. Исследования показали, что для выполнения этих операций эффективно использовать устройства, создающие внешние колебательные воздействия.

Правильный подход к повышению производительности заключается в анализе баланса производительности размалывающих устройств конического типа, где $K = Q_t$ – технологическая производительность, рассматриваемая как условная производительность движения зерна ячменя в зону помола; Q_1 – производительность размалывающих устройств конического типа, снижающаяся из-за неплотности потока зерна ячменя, а также образования пробок; Q_2 – фактическая производительность размалывающих устройств конического типа, обеспечивающих подачу правильно ориентированных зерен ячменя.

Такой подход позволяет выявить резервы повышения эффективности работы оборудования:

$$K = \frac{v_{cp}}{d},$$

где v_{cp} – средняя скорость движения зерна ячменя, м/с; d – диаметр или длина зерна ячменя, м.

Производительность размалывающих устройств конического типа в результате неплотности потока:

$$Q_1 = k_1 \cdot K = k_1 \frac{v_{cp}}{d}. \quad (1)$$

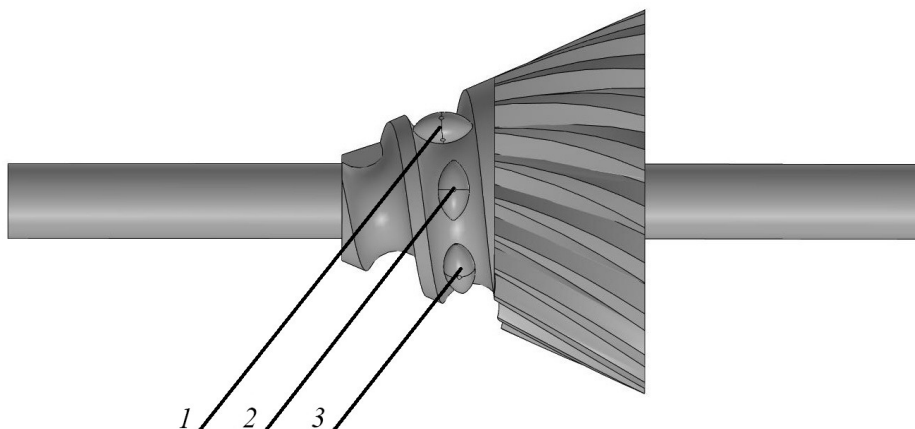
⁵ Ушаков А. Н. Динамика зерновых систем под воздействием вибраций. Казань : Казанский университет, 1990. 240 с.

⁶ Хомяков В. А., Гаврилов А. С. Методы расчета вибрационных процессов в промышленности. М. : Стройиздат, 1977. 290 с.

Фактическая производительность размалывающих устройств конического типа при правильной ориентации зерна ячменя:

$$Q_2 = k_2 \cdot K = k_2 \frac{v_{cp}}{d}. \quad (2)$$

В формулах (1), (2) k_1 – коэффициент заполнения бункера зерном ячменя; k_2 – коэффициент заполнения бункера зерном ячменя при правильной ориентации, выражаемый в процентах, измеряемый в интервале от 0 до 1. Естественно, что $k_2 > k_1$, поэтому и $Q_2 > Q_1$. Таким образом, баланс производительности размалывающих устройств имеет четкую специфику и подчиняется определенным закономерностям. Правильная ориентация зерна ячменя в жерновах существенно повышает производительность размола благодаря нескольким ключевым факторам. Во-первых, она позволяет равномерно распределять нагрузку на рабочие поверхности жерновов, что снижает их износ и обеспечивает стабильную работу оборудования. Во-вторых, зерно, попадающее в зону размола под оптимальным углом, создает меньшее сопротивление, что уменьшает энергозатраты на процесс. Кроме того, ориентация зерен способствует более эффективному разрыву оболочки и измельчению ядра, что улучшает однородность получаемого продукта (рис. 1).



Р и с. 1. Ориентирование зерна ячменя в подающем шнеке:
1 – неправильная ориентация; 2, 3 – правильная ориентация

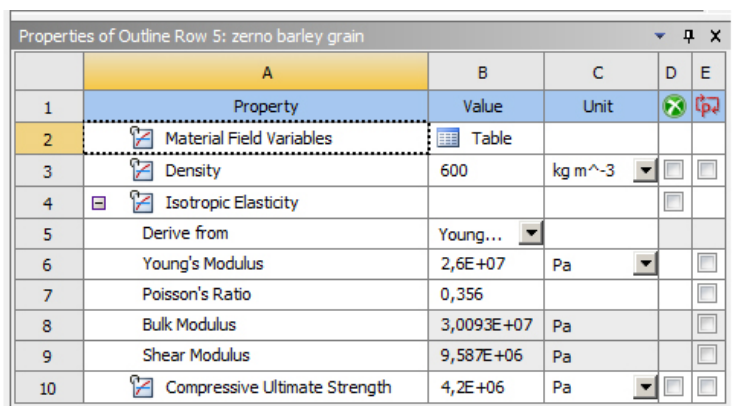
F i g. 1. Orientation of barley grain in the feed auger:
1 – incorrect orientation; 2, 3 – correct orientation

Источник: рисунки 1, 6, 7, 9 составлены автором статьи.
Source: figures 1, 6, 7, 9 are compiled by the author of the article.

Также ориентированные зерна ячменя обрабатываются быстрее и равномернее, что увеличивает объем перерабатываемого сырья за единицу времени. Таким образом, внедрение технологий ориентации зерна ячменя, таких как устройства, создающие внешние колебательные воздействия, позволяют значительно повысить эффективность и производительность размола [9].

Материалы и методы. Выполним численное моделирование для определения частот собственных колебаний зерна ячменя. Для этого используется модальный анализ в программном обеспечении ANSYS. В рамках анализа строится трехмерная модель зерна ячменя, учитывающая ее реальные геометрические характеристики (форма, размеры, масса), а также физико-механические свойства (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона). На основе метода конечных элементов рассчитываются собственные частоты и формы колебаний зерна ячменя.

Моделирование изнашивания поверхностей конических жерновов машин для дробления и размола кормов производилось в программе ANSYS и включало в себя несколько ключевых этапов, которые помогли создать точную модель, отражающую физические процессы, происходящие в рассматриваемом зерне ячменя. Вначале была создана детальная 3D-модель размалываемого материала (зерна ячменя). Затем запустили сеточную генерацию для создания качественной расчетной сетки. Хорошо сформированная сетка была необходима для получения точных результатов. Плотность зерна ячменя рассчитывалась на базе экспериментальных данных по формуле $\rho = \frac{m}{V}$, где масса $m = 0,04$ г, а объем $66,6 \text{ мм}^3$. Следом задавались физические свойства зерна ячменя, такие как модуль Юнга, плотность, коэффициент Пуассона, взятые из литературных источников [10] (рис. 2).



	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	600	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young...			
6	Young's Modulus	2,6E+07	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,356			
8	Bulk Modulus	3,0093E+07	Pa		
9	Shear Modulus	9,587E+06	Pa		
10	Compressive Ultimate Strength	4,2E+06	Pa		

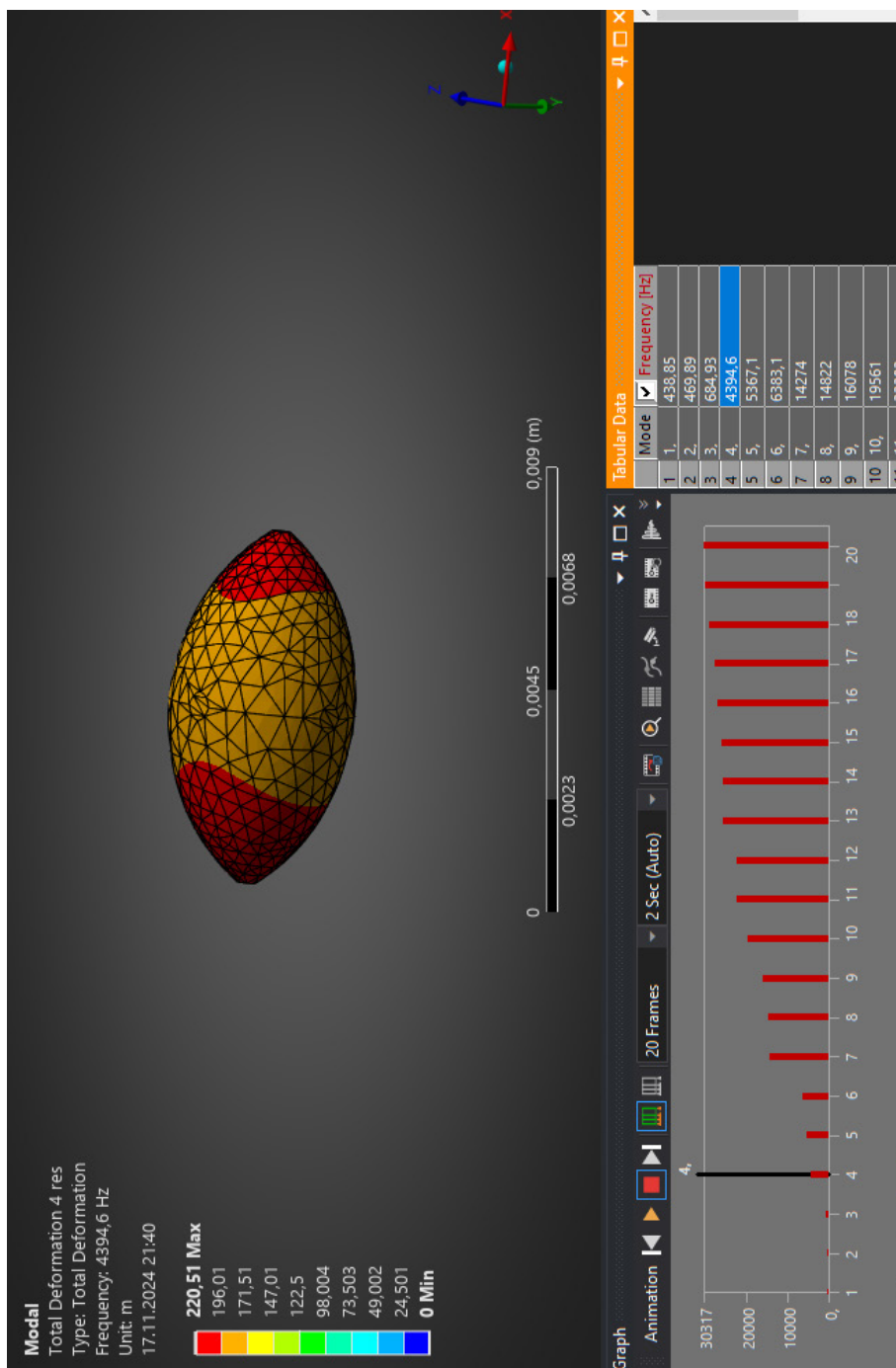
Р и с. 2. Физические свойства зерна ячменя

F i g. 2. Physical properties of barley grain

Источник: на рисунках 2–5 снимки интерфейса программы ANSYS.

Source: figures 2–5 are screenshot of the ANSYS program interface.

Далее был выбран тип анализа Mechanical модуль Modal Analysis для определения собственных частот колебаний. После завершения расчета ANSYS предоставил результаты, включая собственные частоты и соответствующие формы колебаний (модальные формы). Это помогло выявить зоны, подверженные резонансным колебаниям (рис. 3).



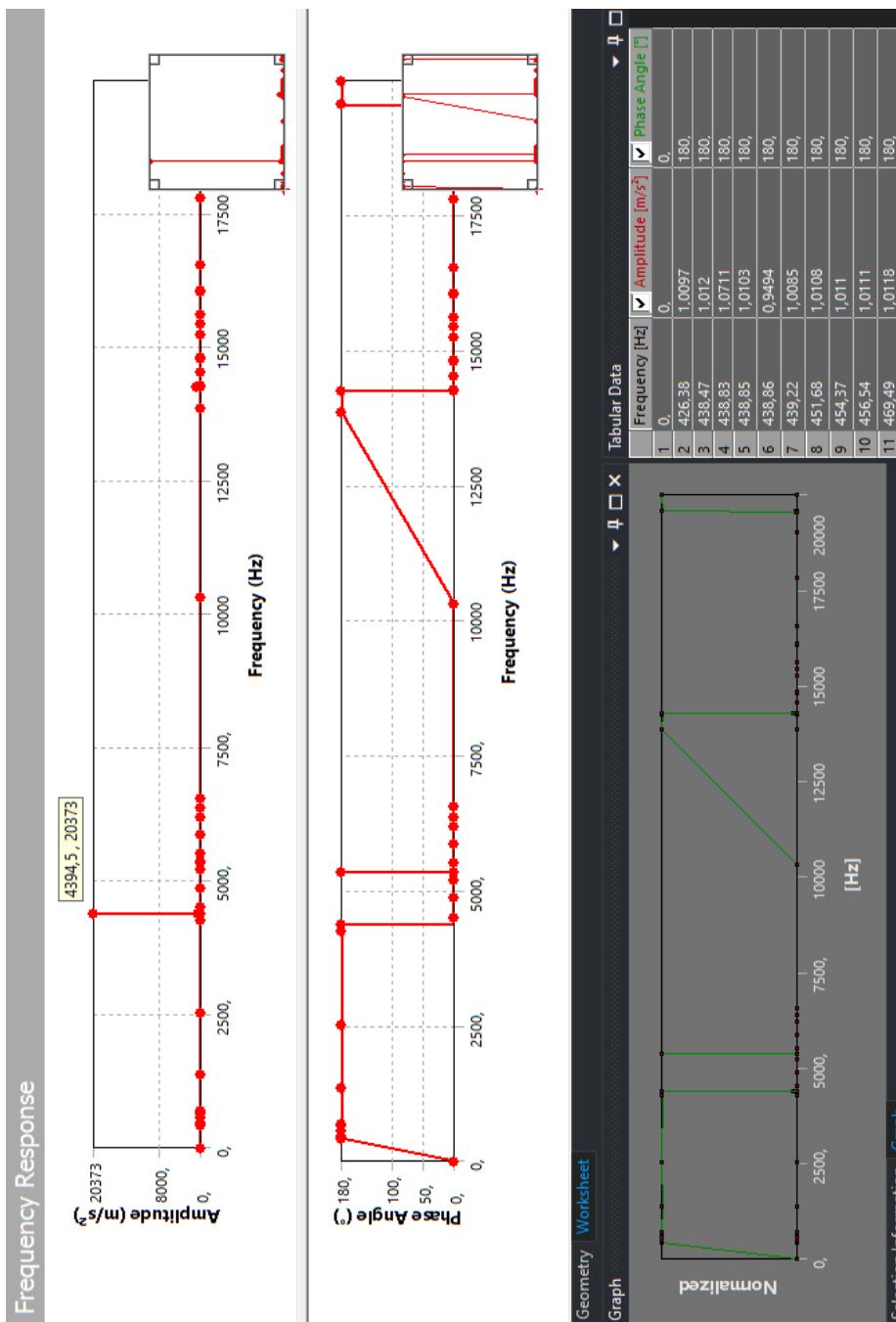
Р и с. 3. Собственная частота и форма колебаний для зерна ячменя для 4 394 Гц
Fig. 3. Natural frequency and vibration mode for barley grain for 4 394 Hz

Для решения поставленных задач, связанных с изучением динамических характеристик зерна ячменя при внешнем колебательном воздействии, в ANSYS были проведены расчеты гармонического отклика (Harmonic Response), частотного отклика (Frequency Response), направленного ускорения (Directional Acceleration) и направленной деформации (Directional Deformation). Гармонический отклик позволил определить поведение зерна ячменя при воздействии периодических колебаний, идентифицируя диапазоны частот, при которых амплитуды отклика достигают максимальных значений. Частотный отклик предоставил информацию о реакциях системы на различные частоты внешнего воздействия, что необходимо для точного определения резонансной частоты. Направленное ускорение показало, как изменяется динамическое воздействие на зерно ячменя в определенной пространственной ориентации, что критически важно для анализа транспортировки и ориентации зерна ячменя в загрузочном бункере. Направленная деформация характеризует изменение геометрии зерна ячменя в результате внешнего колебательного воздействия, что позволяет учесть особенности упругих деформаций материала. Комплексный анализ данных расчетов обеспечил детальное понимание динамических процессов и служил основой для настройки оборудования, создающего внешние колебательные воздействия на оптимальные частотные режимы.

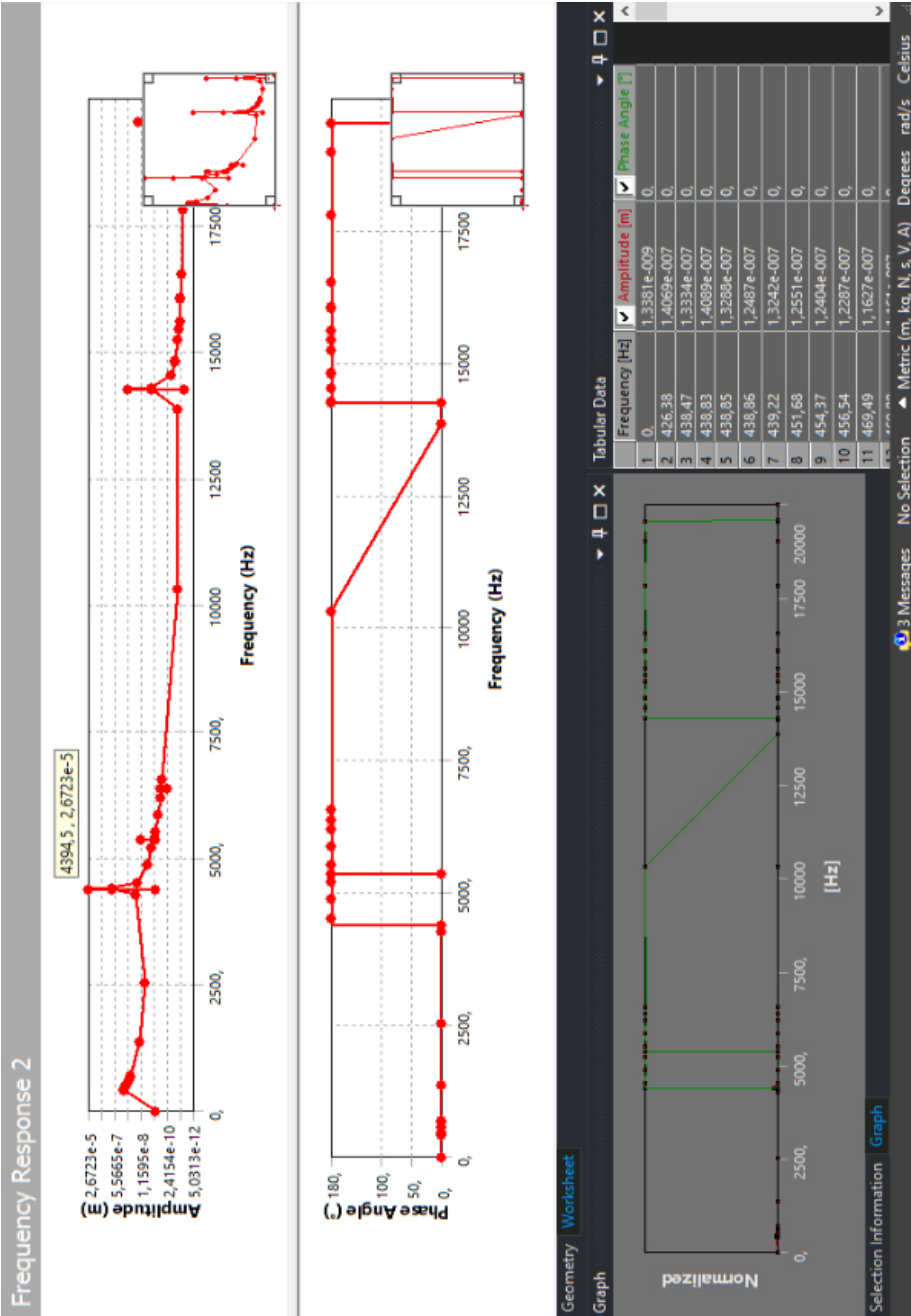
График направленного ускорения показывает зависимость амплитуды ускорения зерна ячменя от частоты внешнего колебательного воздействия. На частоте 4 394 Гц амплитуда ускорения достигает максимального значения. Это свидетельствует о резонансном усилении внешнего колебательного воздействия, при котором передача энергии от вибромотора к зерну происходит наиболее эффективно [11]. Такой эффект критически важен для повышения скорости транспортировки и оптимизации подачи зерна ячменя в мельницу (рис. 4).

Следом рассмотрим график направленной деформации, построенный на основе данных гармонического анализа в ANSYS, иллюстрирующий зависимость амплитуды деформации зерна ячменя от частоты внешнего колебательного воздействия. На частоте 4 394 Гц наблюдается максимальное значение амплитуды деформации. Этот эффект является следствием резонансного усиления, при котором упругие свойства зерна ячменя и динамические параметры внешнего колебательного воздействия находятся в фазовом соответствии, что приводит к эффективному накоплению энергии в зерне ячменя.

Максимальная амплитуда деформации имеет большое значение для оптимизации процессов передвижения и подачи зерна ячменя в мельницу и достигается при воздействии на зерно ячменя частотой 4 394 Гц. Под воздействием внешнего колебательного воздействия с такой частотой зерно ячменя начинает колебаться с увеличенными амплитудами [12–14], что облегчает их перемещение и способствует улучшению пространственной ориентации. Важной особенностью является то, что направленная деформация указывает на преобладающую ориентацию зерна ячменя во время его движения. Это критически важно в условиях загрузочного бункера и шнека, где правильное позиционирование зерна ячменя способствует равномерной подаче в размалывающие жернова (рис. 5).



Р и с. 4. График направленного ускорения для зерна ячменя для 4 394 Гц
Fig. 4. Graph of directional acceleration for barley grain for 4 394 Hz



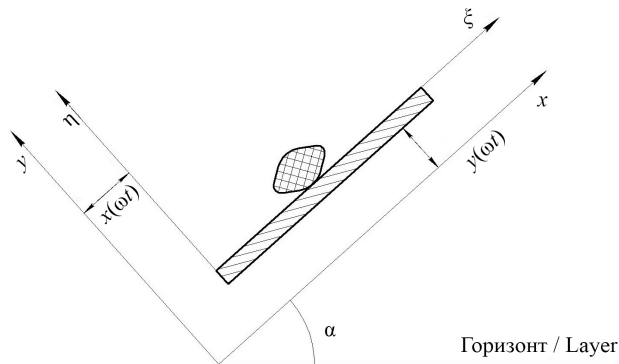
Р и с. 5. График направленной деформации для зерна ячменя для 4 394 Гц
Fig. 5. Graph of directional deformation for barley grain for 4 394 Hz

Таким образом, анализ направленной деформации подтверждает резонансное поведение зерна ячменя на частоте 4 394 Гц и обосновывает выбор данной частоты для повышения производительности мельницы.

Результаты исследования. Теоретически обоснуем влияние колебаний на движение зерна ячменя. Рассмотрим случай разрушения зерновых культур в конических мельницах, где первоначальное движение происходит по наклонным поверхностям загрузочного бункера. Наклонные поверхности совершают периодические колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, сначала получаемые от воздействия приводного двигателя, а в дальнейшем от воздействия устройства, создающего дополнительные колебания. Рассмотрим режим с двумя мгновенными остановками и составим уравнения движения зерна ячменя по двум взаимно перпендикулярным направлениям:

$$\left. \begin{aligned} mW_x &= -mg \cdot \sin \alpha - F_{\text{Тр}} + F_{\text{возм}_x} \\ mW_y &= -mg \cdot \cos \alpha + N + F_{\text{возм}_y} \end{aligned} \right\},$$

где W_x и W_y – абсолютные ускорения зерна ячменя по оси x и y , м/с^2 ; α – угол наклона поверхности бункера, град.



Р и с. 6. Колебания загрузочного бункера в двух взаимно перпендикулярных направлениях
F i g. 6. Oscillations of the loading hopper in two mutually perpendicular directions

Абсолютные ускорения зерна ячменя складываются из относительных и переносных [15]. В то же время переносными ускорениями для зерна ячменя являются абсолютные ускорения загрузочного бункера:

$$\left. \begin{aligned} W_x &= W_{ex} + W_{rx} = \ddot{x}_B + \ddot{\xi} \\ W_y &= W_{ey} + W_{ry} = \ddot{y}_B + \ddot{\eta} \end{aligned} \right\},$$

где $W_{ex} = \ddot{x}_B$; $W_{ey} = \ddot{y}_B$ – переносные ускорения для зерна ячменя, равные абсолютным ускорениям загрузочного бункера по осям x и y , м/с^2 ; $W_{rx} = \ddot{\xi}$; $W_{ry} = \ddot{\eta}$ – относительные ускорения зерна ячменя по осям x и y , м/с^2 .

Возмущающую силу $F_{\text{возм}}$ выразим через ускорения наклонной поверхности, учитывая ее движение. Такой подход позволит связать характеристики колебаний основания с движением зерна ячменя [16]. Зададим продольные колебания загрузочного бункера бигармоническими, поперечные – гармоническими:

$$\left. \begin{aligned} x_B &= A_x \sin \omega t + B_x \sin 2(\omega t + \varepsilon) \\ y_B &= A_y \sin(\omega t + \varepsilon) \end{aligned} \right\},$$

где x_B, y_B – абсолютные перемещения загрузочного бункера, м; A_y – амплитуда вертикальных колебаний, м; B_x – амплитуда второй составляющей бигармонического закона колебаний, м; ω – угловая скорость, рад/с; ε – угловое ускорение, рад/с²; t – время, с.

Для упрощения аналитического описания движения зерна было принято допущение, согласно которому угол сдвига фаз между составляющими бигармонического колебания считается равным углу сдвига фаз между вертикальными колебаниями и их первой гармоникой [17]. Абсолютные скорости и ускорения загрузочного бункера по осям x и y следующие:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_B &= A_x \omega \cos \omega t + 2B_x \omega \cos 2(\omega t + \varepsilon) \\ \ddot{x}_B &= A_x \omega^2 \sin \omega t - 4B_x \omega^2 \sin 2(\omega t + \varepsilon) \\ \dot{y}_B &= A_y \omega \cos(\omega t + \varepsilon) \\ \ddot{y}_B &= -A_y \omega^2 \cos(\omega t + \varepsilon) \end{aligned} \right\}.$$

Уравнения относительного движения зерна ячменя по наклонной поверхности загрузочного бункера имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\xi} &= mA_x \omega^2 \sin \omega t + 4mB_x \omega^2 \sin 2(\omega t + \varepsilon) - mg \sin \alpha \pm fN \\ m\ddot{\eta} &= mA_y \omega^2 \sin(\omega t + \varepsilon) - mg \cos \alpha + N \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения скольжения; A_x – амплитуда горизонтальных колебаний, м.

Из условия непрерывности движения зерна ячменя $\eta = 0$ из второго уравнения определим нормальную реакцию N , Н:

$$N = N(t) = mg \cos \alpha - mA_y \omega^2 \sin(\omega t + \varepsilon). \quad (4)$$

Подставим формулу (4) в первое уравнение системы (3) и сократим все члены на m :

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} &= A_x \omega^2 \sin \omega t + 4B_x \omega^2 \sin 2(\omega t + \varepsilon) - g(\sin \alpha \pm f \cos \alpha) \pm \\ &\pm fA_y \omega^2 \sin(\omega t + \varepsilon). \end{aligned} \quad (5)$$

Для простоты математических вычислений верхние знаки задаем соответствующими движению вперед, нижние – движению назад. В последней формуле (5) произведем преобразование некоторых членов:

$$A_x \omega^2 \sin \omega t \pm fA_y \omega^2 \sin(\omega t + \varepsilon) = A_{\pm} \omega^2 s,$$

$$\text{где } A_{\pm} = \sqrt{A_x^2 + fA_y^2 \pm 2A_x fA_y \cos \varepsilon};$$

$$\varphi_{\pm} = \pm \frac{fA_y \sin \varepsilon}{A_x \pm fA_y \cos \varepsilon}.$$

С учетом преобразований запишем уравнение относительного ускорения, скорости и перемещения зерна ячменя по колеблющейся поверхности загрузочного бункера на этапах прямого и обратного проскальзывания:

$$\ddot{\xi} = A_{\pm} \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_{\pm}) + 4B_x \omega^2 \sin 2(\omega t + \varepsilon) - g(\sin \alpha \pm f \cos \alpha);$$

$$\dot{\xi} = -A_{\pm} \omega \cos(\omega t + \varphi_{\pm}) + A_{\pm} \omega \cos(\omega t^* + \varphi_{\pm}) - 2B_x \omega \cos 2(\omega t + \varepsilon) + 2B_x \omega \cos 2(\omega t^* + \varepsilon) - g(\sin \alpha \pm f \cos \alpha)(t - t^*) + c;$$

$$\xi = -A_{\pm} [\sin(\omega t + \varphi_{\pm}) - \sin(\omega t^* + \varphi_{\pm}) - (t - t^*) \cos(\omega t^* + \varphi_{\pm})] - B_x [\sin 2(\omega t + \varepsilon) - \sin 2(\omega t^* + \varepsilon) - (t - t^*) \cos 2(\omega t^* + \varepsilon)] - g(\sin \alpha \pm f \cos \alpha) \frac{(t - t^*)^2}{2} + c_1(t - t^*) + c_2.$$

В режиме с двумя мгновенными остановками относительная скорость зерна ячменя равняется нулю ($\dot{\xi} = 0$) в момент $t = t_1$ смены скольжения назад на скольжение вперед [18]. Используя это граничное условие, получим значения постоянных интегрирования. Примем за начало отсчета времени значения мгновенной остановки. Тогда $t = t^* = t_1$. Следовательно:

$$c_1 = \dot{\xi}(t^*) = \dot{\xi}^* = 0;$$

$$c_2 = \xi(t^*) = \xi^* = 0.$$

С учетом нулевых значений постоянных интегрирования получаем трансцендентное уравнение, которое позволяет определять значения мгновенных остановок при изменении направления скольжения:

$$\dot{\xi}(t) = -A_{\pm} \omega \cos(\omega t + \varphi_{\pm}) - 2B_x \omega \cos 2(\omega t + \varepsilon) + A_{\pm} \omega \cos(\omega t^* + \varepsilon) + 2B_x \omega \cos 2(\omega t^* + \varepsilon) - g(\sin \alpha \pm f \cos \alpha)(t - t^*) = 0;$$

$$A_{\pm} \omega [\cos(\omega t + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t + \varepsilon)] = A_{\pm} \omega [\cos(\omega t^* + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t^* + \varepsilon)] - g(\sin \alpha \pm f \cos \alpha)(t - t^*).$$

Здесь $\lambda_{\pm} = \frac{B_x}{A_{\pm}}$ – соотношение амплитуд.

Сделав некоторые преобразования, получим:

$$\begin{aligned} & [\cos(\omega t + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t + \varepsilon)] = \\ & = [\cos(\omega t^* + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t^* + \varepsilon)] - Z_{\pm}(\omega t - \omega t^*), \end{aligned} \quad (6)$$

где $Z_{\pm}$ – безразмерная величина, равная отношению ускорения к ускорению колебаний загрузочного бункера, взятого по первой гармонике при движении вперед или назад:

$$Z_{\pm} = \frac{g(\sin \alpha \pm f \cos \alpha)}{A_{\pm} \omega^2}.$$

Проанализируем уравнение (6). Левая его часть $\cos(\omega t + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t + \varepsilon)$ является уравнением виброскорости загрузочного бункера. В правой части выражение $\cos(\omega t^* + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t^* + \varepsilon)$ определяет значение виброскорости загрузочного бункера в момент мгновенной остановки ωt^* . Выражение $Z_{\pm}(\omega t - \omega t^*)$ определяет уравнение прямой линии в пределах от ωt^* до ωt . Для определения средней скорости движения зерна ячменя по наклонной поверхности загрузочного бункера составим выражения, соответствующие безразмерной виброскорости поверхности загрузочного бункера на этапах проскальзывания вперед и назад. Так как значения каждой из мгновенных остановок ωt_1 и ωt_2 для этих кривых совпадают [19], то есть однозначны, скольжение начинается из точки на той кривой, которая соответствует начавшемуся этапу [20]. Этап скольжения вперед начинается из точки, соответствующей мгновенной остановке ωt_1 и лежащей на бигармонической кривой $\cos(\omega t + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t + \varepsilon)$. Соответственно, этап скольжения назад начинается из точки мгновенной остановки ωt_2 , лежащей на кривой $\cos(\omega t^* + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t^* + \varepsilon)$.

Углы наклона прямых, соответствующих абсолютной скорости зерна ячменя, определяются следующими выражениями:

$$\gamma_+ = \arctg Z_+; \quad (7)$$

$$\gamma_- = \arctg Z_- . \quad (8)$$

Для определения средней скорости движения зерна ячменя методом поэтапного интегрирования составляем интегралы интересующих нас площадей на этапах прямого и обратного скольжения. Пределами интегрирования являются значения мгновенных остановок и линии [21], ограничивающие эти площади, то есть законы колебаний загрузочного бункера и зерна ячменя. Значения мгновенных остановок взяты из соответствующей литературы [1]. Таким образом, средняя скорость движения зерна ячменя по поверхности колеблющегося загрузочного бункера определяется выражением:

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \sum S_1, \quad (9)$$

где T – период колебаний ($T = 2\pi$).

$$\sum S_1 = S_+ + S_-, \quad (10)$$

где S_+ – площадь заштрихованной фигуры со знаком (+); S_- – площадь заштрихованной фигуры со знаком (–). Площадь заштрихованных фигур определяется интегралами:

$$S_+ = \int_{t_1}^{t_2} \int_{\dot{x}_{\text{Б}+}}^{\dot{x}_{\text{Ч}+}} \omega dv \cdot dt; \quad (11)$$

$$S_- = \int_{t_2}^{t_1+2\pi} \int_{\dot{x}_{B-}}^{\dot{x}_{q-}} \omega dv \cdot dt, \quad (12)$$

где $x_{q\pm} = \cos(\omega t^* + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t^* + \varepsilon) - Z_{\pm}(\omega t - \omega t^*)$;

$$x_{B\pm} = \cos(\omega t + \varphi_{\pm}) + 2\lambda_{\pm} \cos 2(\omega t + \varepsilon).$$

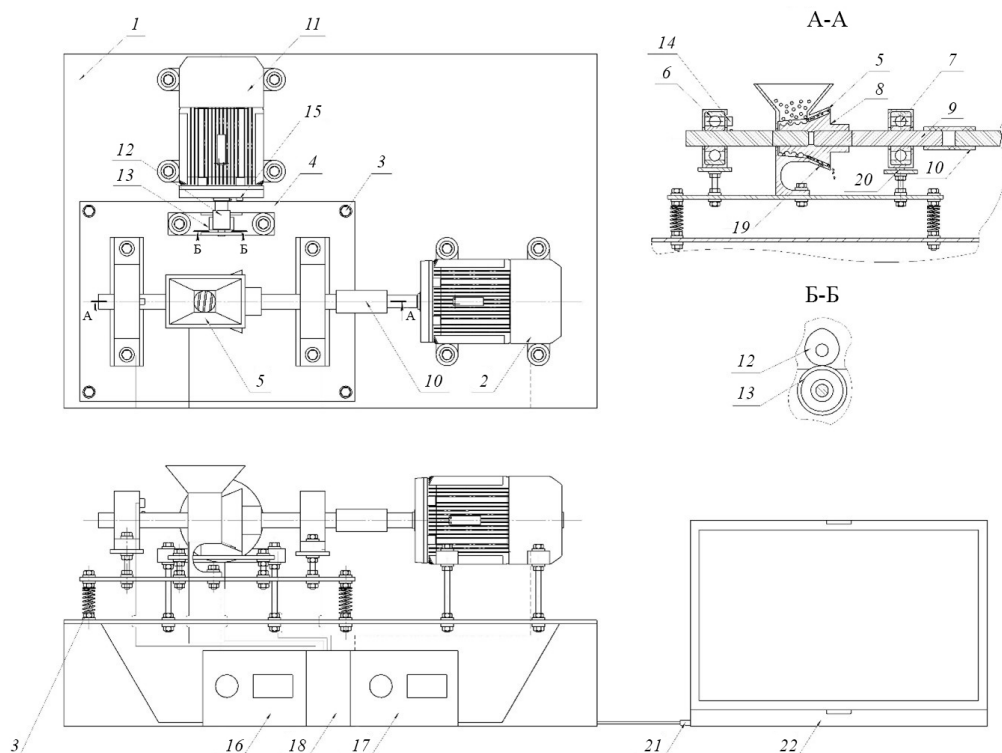
В рамках исследования для повышения производительности конической мельницы был проведен расчет резонансных частот зерна ячменя с использованием численного моделирования в ANSYS, что позволило определить собственную частоту колебаний зерна ячменя, равную 4 394 Гц. Полученные данные использовались для анализа внешнего колебательного воздействия с целью увеличения скорости транспортирования зерна ячменя в загрузочном бункере и улучшения его ориентации перед попаданием в размалывающие жернова. Было решено использовать значения частот колебаний, воздействующих на систему для оценки средней скорости движения зерна ячменя. При помощи программных расчетов, выполненных в Python, были подставлены значения частот и параметров системы в формулы (7)–(12), а затем проведен анализ кинематических характеристик зерна ячменя. Рассчитанные данные показали, что средняя скорость зерна ячменя увеличивается с 0,70 м/с без воздействия колебаний до 0,96 м/с при добавлении внешнего колебательного воздействия с частотой собственных колебаний зерна ячменя, составляющей 4 394 Гц, что на 27,0833 % быстрее и тем самым теоретически подтверждает эффективность использование внешнего колебательного воздействия.

Для проверки теоретических данных создана экспериментальная установка [22]. Вибромотор, настроенный на частоту 4 394 Гц, обеспечивал внешнее колебательное воздействие на зерно в процессе его перемещения по загрузочному бункеру и дальнейшего его разрушения. Измерения проводились с использованием высокоточных весов для взвешивания и точной дозировки зерна ячменя, датчиков скорости, расположенных на установке, программного обеспечения ARDUINO для оценки времени, затраченного на разрушение каждой порции. Схема установки представлена на рисунке 7.

С помощью пульта управления 17 задается необходимая частота вращения электрического коллекторного двигателя 2, которая через соединительную муфту 10 передается на ротор 8 посредством горизонтального вала 9. В конусообразный бункер загружается исследуемое зерно, которое дозированно поступает на подвижный конус ротора 8. В процессе работы поддерживается постоянное контактное давление между зерном и поверхностями ротора 8 и статора 5, регулируемое зазором между ними.

Для создания внешнего колебательного воздействия использовался двигатель Welling HXGM21.03 с максимальной частотой вращения 17 000 об/мин. Частота вращения ведущего вала двигателя 2 фиксируется датчиком оборотов 14. За счет вращения зубчатой поверхности 12 и ее соударения с толкателем 13 создается колебательное воздействие, передающееся подвижной платформе. Количество

зубьев поверхности 12, а также частота ее вращения определяет амплитуду и частоту колебательного воздействия. Усилие на подвижный жернов измеряется тензометрическим датчиком 20. Эти данные передаются на микроконтроллер пульта управления 18, а затем через USB-кабель 21 и виртуальный COM-порт на персональный компьютер 22 с установленным программным обеспечением. Вся информация обрабатывается, отображается на экране компьютера и сохраняется на электронный носитель.



Р и с. 7. Схема установки для разрушения зерна ячменя в конических мельницах:
1 – рама; 2 – электрический коллекторный двигатель; 3 – пружинные крепежные элементы; 4 – подвижная платформа; 5 – неподвижный корпус; 6 – горизонтальный вал; 7, 8 – подшипники скольжения; 9 – зерно ячменя; 10 – соединительная муфта; 11 – электрический коллекторный двигатель; 12 – зубчатая поверхность; 13 – толкатель; 14, 15 – датчики оборотов; 16, 17 – пульты управления; 18 – микроконтроллер; 19 – датчик температуры; 20 – тензометрический датчик усилия; 21 – USB-кабель; 22 – персональный компьютер

Fig. 7. Scheme of the installation for crushing barley grain in conical mills:
1 – frame; 2 – electric commutator motor; 3 – spring fasteners; 4 – movable platform; 5 – fixed body; 6 – horizontal shaft; 7, 8 – friction bearings; 9 – barley grain; 10 – coupling; 11 – electric commutator motor; 12 – toothed surface; 13 – pusher; 14, 15 – speed sensors; 16, 17 – control panels; 18 – microcontroller; 19 – temperature sensor; 20 – strain gauge force sensor; 21 – USB-cable; 22 – personal computer

Примечание: А, В – секущая плоскость; А-А – профильный разрез конической мельницы; В-В – местный разрез зубчатой поверхности и толкателя.

Note: A, B – cutting plane; A-A – profile section of a conical mill; B-B – local section of the toothed surface and pusher.

Для оценки влияния внешнего колебательного воздействия, прилагаемого с частотой собственных колебаний зерна ячменя, на производительность мельницы была проведена серия экспериментов. Методика заключалась в сравнительном анализе времени, необходимого для размола одинаковых партий зерна ячменя, с приложением внешнего колебательного воздействия и без него. Используемые партии зерна ячменя были предварительно взвешены с высокой точностью на лабораторных весах, что позволило исключить влияние различий в массе на результаты эксперимента (рис. 8).



Р и с. 8. Взвешивание зерна ячменя

F i g. 8. Weighing barley grain

Источник: фотография сделана И. С. Карцевым во время проведения эксперимента в лаборатории трения для экстремальных условий в институте машиноведения имени А. А. Благонравова РАН (14.03.2024).

Source: photo is taken by I. S. Kartsev during the experiment in the laboratory of friction for extreme conditions at the A. A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (14.03.2024).

Условия проведения опыта были стандартизированы: партии загружались в мельницу в одинаковых режимах, а начальные параметры, такие как частота вращения жерновов и конструктивные характеристики мельницы, оставались неизменными.

В первом режиме эксперимент проводился без включения вибромотора, то есть зерно перемещалось в загрузочном бункере и подавалось в размалывающий шнек исключительно под действием гравитации. Время размола фиксировалось с помощью точного секундомера и варьировалось в зависимости от массы партии. Второй режим подразумевал включение вибромотора, генерирующего колебания с частотой 4 394 Гц, настроенной на резонансные частоты зерна ячменя. Эти колебания передавались через стенки загрузочного бункера, вызывая усиление динамической ориентации и перемещения зерна ячменя. При этом поток зерна ячменя становился более равномерным, а время прохождения через бункер сокращалось.

Анализ результатов показал значительное сокращение времени, необходимого для размола одной партии зерна ячменя, при внешнем колебательном воздействии. Например, для партии массой 0,03 кг в режиме без внешнего колебательного воздействия время размола уменьшилось с 67 до 51 с. при включенном вибромоторе,

что соответствует снижению времени, необходимого для размола одной партии зерна ячменя на 23,89 %. Такая динамика объясняется улучшением условий подачи зерна ячменя в зону размола, вызванным воздействием внешних колебаний. Под влиянием резонансных колебаний зерно лучше ориентируется в пространстве, уменьшается вероятность формирования пробок или задержек в загрузочном бункере и шнеке. Это обеспечивает более стабильный и равномерный поток материала к жерновам. Пример оптимальной ориентации зерна ячменя, полученной в результате эксперимента, показан на рисунке 9 (зерна ячменя ориентированы параллельно направлению движения по подающему шнеку).



Р и с. 9. Ориентирование зерна ячменя в подающем шнеке:
1 – правильная ориентация; 2 – наклонная поверхность загрузочного бункера

F i g. 9. Orientation of barley grain in the feed screw:
1 – correct orientation; 2 – inclined surface of the loading hopper

Результаты, полученные в ходе экспериментальной проверки, подтверждают высокую эффективность применения внешнего колебательного воздействия, настроенного на частоту собственных колебаний зерна ячменя (4 394 Гц), для повышения производительности конических мельниц благодаря улучшению пространственной ориентацию зерна в подающем шнеке и сокращению времени размола партии зерна.

Определена частота собственных колебаний зерна ячменя с использованием численного моделирования, составляющая 4 394 Гц. Теоретически обосновано влияние внешнего колебательного воздействие на движение зерна ячменя. Рассчитанные данные показали, что средняя скорость транспортирования зерна ячменя в зону размола увеличивается с 0,70 м/с без воздействия колебаний до 0,96 м/с при воздействии внешнего колебательного воздействия с частотой собственных колебаний зерна ячменя, составляющей 4 394 Гц, что сокращает время переработки одной партии на 27,0833 % и уменьшает энергозатраты на ~ 21 %. Этот подход минимизирует потери времени при сохранении высокого качества продукции, что особенно важно в условиях промышленного применения. Экспериментально

доказано сокращение времени, необходимого для размола одной партии зерна ячменя, при воздействии внешнего колебательного воздействия. Для партии массой 0,03 кг время размола уменьшилось с 67 с. в режиме без внешнего колебательного воздействия до 51 с. при включенном вибромоторе, что соответствует снижению на 23,89 %.

Обсуждение и заключение. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что настройка внешнего колебательного воздействия на частоту собственных колебаний зерна ячменя является эффективным способом повышения производительности мельницы.

Для оценки энергоэффективности рассмотрим пример использования предложенного метода на базе УПЗ-(ВХ) (большая установка для переработки зерна и зерновых смесей), потребляемая мощность с подогревом и перемешиванием которой составляет 5 кВт, с установленным на нее двигателем для создания внешнего колебательного воздействия. Применение двигателя, способного возбуждать колебания с заданной частотой, обеспечивает передачу механических колебаний через систему жерновов непосредственно к зерну, вызывая его резонансное воздействие. Этот принцип сохраняется при масштабировании, поскольку вибромотор генерирует заданные колебания независимо от размеров установки, а передача энергии через жернова остается неизменной при рассмотрении в пределах масс, задействованных в установках промышленного типа для зерноперерабатывающего оборудования. Таким образом, перенос метода с лабораторной установки на промышленную мельницу обоснован, так как динамические условия воздействия на зерно сохраняются. Потребляемая мощность двигателя для создания внешнего колебательного воздействия составляет 200 Вт. Следовательно, дополнительная мощность составляет 4 %.

Применение двигателя, способного возбуждать колебания с заданной частотой, обеспечивает передачу механических колебаний через систему жерновов непосредственно к зерну, вызывая его резонансное воздействие. Этот принцип сохраняется при масштабировании, поскольку вибромотор генерирует заданные колебания независимо от размеров установки, а передача энергии через жернова остается неизменной при рассмотрении в пределах масс, задействованных в установках промышленного типа для зерноперерабатывающего оборудования.

Установили, что добавление вибрационного двигателя сокращает время переработки на 24 % (взято наименьшее значение). Новая продолжительность процесса составит 76 % от исходного времени. Проведем сравнительный анализ. Без вибрационного двигателя энергопотребление за цикл составит $5 \text{ кВт} \cdot t = 5t \text{ кВт}$. С двигателем для создания внешнего колебательного воздействия новое время цикла составит 0,76 T . Общая мощность составит $5 \text{ кВт} + 0,2 \text{ кВт} = 5,2 \text{ кВт}$, а энергопотребление за цикл – $5,2 \text{ кВт} \cdot 0,76t = 3,952t \text{ кВт}$. Соответственно, экономия энергии составила $5t - 3,952t = 1,048 T \text{ кВт}$, а процентная экономия – $\frac{1,048t}{5t} \cdot 100 \% = 20,96 \%$.

Таким образом, результаты экспериментальной оценки подтверждают теоретические предположения о влиянии внешних колебательных воздействий на улучшение транспортных и технологических характеристик зерна ячменя, предоставляя обоснование для дальнейшей оптимизации процессов размола.

Полученные результаты имеют прикладное значение для разработки инновационных решений в области переработки зерна ячменя, способствующих повышению эффективности и стабильности технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Клепиков С.И. Вибрационные загрузочные устройства с безотрывными режимами транспортирования. *Вестник ТОГУ*. 2016;(4):81–86. <https://elibrary.ru/ygjert>
Klepikov S.I. Vibrating Boot Device with Unseparated Transportation Mode. *Bulletin of PNU*. 2016;(4):81–86. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ygjert>
2. Cai H., Miao G. Shear Flow Dynamics in Vibrated Granular Materials: Analysis of Viscosity Transitions and Non-Newtonian Behaviors. *International Journal of Multiphase Flow*. 2024;178:104891. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104891>
3. Clark A.H., Brodsky E.E., Nasrin H.J., Taylor S.E. Frictional Weakening of Vibrated Granular Flows. *Physical Review Letters*. 2023;130:118201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.118201>
4. Sonar P., Bhateja A., Sharma I. Granular Flows Over Normally Vibrated Inclined Bases. *Physical Review Fluids*. 2024;9:124304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.124304>
5. Carlevaro C.M., Kuperman M.N., Bouzat S., Pugnaloni L.A., Madrid M.A. On the use of Magnetic Particles to Enhance the Flow of Vibrated Grains Through Narrow Apertures. *ArXiv Is Hiring a DevOps Engineer*. 2021:2106.14864. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.14864>
6. Plati A., Puglisi A. Collective Drifts in Vibrated Granular Packings: the Interplay of Friction and Structure. *ArXiv Is Hiring a DevOps Engineer*. 2021:2110.07931. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.07931>
7. Guo Q., Zhang Y., Padash A., Xi K., Kovar T.M., Boyce C.M. Dynamically Structured Bubbling in Vibrated Gas-Fluidized Granular Materials. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021;118(35):e2108647118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2108647118>
8. Pascot A., Morel J.-Y., Antonyuk S., Jenny M., Chen Y., De Richter S.K. Discharge of Vibrated Granular Silo: A Grain Scale Approach. *Powder Technology*. 2022;397:116998. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.042>
9. Bhadani K., Asbjörnsson G., Hulthén E., Hofling K., Evertsson M. Application of Optimization Method for Calibration and Maintenance of Power-Based Belt Scale. *Minerals*. 2021;11(4):412. <https://doi.org/10.3390/min11040412>
10. Фролов Д.И., Лукьянова Е.А. Зависимости свойств экструдатов из ячменя от регулируемых параметров обработки. *Инновационная техника и технология*. 2020;(4):24–29. <https://elibrary.ru/tfnbrd>
Frolov D.I., Lukyanova E.A. Dependences of the Properties of Barley Extrudates on the Controlled Processing Parameters. *Innovative Machinery and Technology*. 2020;(4):24–29. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/tfnbrd>
11. Ahmed G. Weighing Vibratory Apparatus and Method. Patent 5,780,780 US. 1998 July 14. Available at: <https://www.freepatentsonline.com/5780780.html> (accessed 29.10.2024).
12. Adrian N.G., De Carvalho Clayton A., Pinto Thiago H.B., Octávio D.N. System, Equipment and Monitoring Procedure, Predictive Maintenance and Operational Optimization of Vibrating Screens. Patent 2022003692A1 Chile. 2023 June 9. Available at: <https://patents.google.com/patent/CL2022003692A1/en> (accessed 29.10.2024).
13. Hinterdorfer Ch., Hinterreiter Ch. Method for Controlling a Vibratory Conveyor. Patent 523812A1 Austria. 2023 May 15. Available at: <https://patents.google.com/patent/AT523812A1/en> (accessed 29.10.2024).
14. Santos A.P., Srivastava I., Silbert L.E., Lechman J.B., Grest G.S. Fluctuations and Power-Law Scaling of Dry, Frictionless Granular Rheology Near the Hard-Particle Limit. *Physical Review Fluids*. 2022;7:084303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.084303>

15. Polanía O., Cabrera M., Renouf M., Azéma E. Collapse of Dry and Immersed Polydisperse Granular Columns: A Unified Runout Description. *Physical Review Fluids*. 2022;7:084304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.084304>
16. Faroux D., Washino K., Tsuji T., Tanaka T. Granular Fluidity in Cohesive Split-Bottom Granular Flows. *Physical Review Fluids*. 2022;7:084306. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.084306>
17. Perrin H., Wyart M., Metzger B., Forterre Y. Nonlocal Effects Reflect the Jamming Criticality in Frictionless Granular Flows Down Inclines. *Physical Review Letters*. 2021;126:228002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.228002>
18. D'Angelo O., Sperl M., Kranz W.T. Rheological Regimes in Agitated Granular Media under Shear. *Physical Review Letters*. 2025;134:148202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.148202>
19. Imole O.I., Wojtkowski M., Magnanimo V., Luding S. Micro-Macro Correlations and Anisotropy in Granular Assemblies Under Uniaxial Loading and Unloading. *Physical Review E*. 2014;89:042210. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.042210>
20. González S., Windows-Yule C.R.K., Luding S., Parker D.J., Thornton A.R. Forced Axial Segregation in Axially Inhomogeneous Rotating Systems. *Physical Review E*. 2015;92:022202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.022202>
21. Zhang N., Ciantia M.O., Arroyo M., Gens A. A Contact Model for Rough Crushable Sand. *Soils and Foundations*. 2021;61(3):798–814. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.03.002>
22. Албагачиев А.Ю., Карцев И.С. Стенд для проведения испытаний конусообразных образцов на изнашивание. Патент 226914 U1 Российская Федерация. 28 июня 2024. URL: <https://clck.ru/3MMWjG> (дата обращения: 29.10.2024).
Albagachiev A.Yu., Kartsev I.S. [A Stand for Testing Cone-Shaped Samples for Wear]. Patent 226914 U1 Russian Federation. 2024 June 28. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3MMWjG> (accessed 29.10.2024).

Об авторе:

Карцев Иван Сергеевич, аспирант по направлению подготовки «Машиностроение» Института машиноведения имени А. А. Благоврадова Российской академии наук (101000, Российская Федерация, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6203-441X>, Researcher ID: [MZS-1029-2025](https://orcid.org/0009-0002-6203-441X), Scopus ID: [57221442149](https://orcid.org/0009-0002-6203-441X), SPIN-код: [9993-4937](https://orcid.org/0009-0002-6203-441X), johnkarcev@gmail.com

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 09.12.2024; поступила после рецензирования 24.12.2024; принята к публикации 09.01.2025

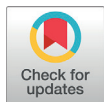
About the author:

Ivan S. Kartsev, Postgraduate Student in the Field of Preparation “Mechanical Engineering”, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4 Maly Kharitonyevsky Lane, Moscow 101000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6203-441X>, Researcher ID: [MZS-1029-2025](https://orcid.org/0009-0002-6203-441X), Scopus ID: [57221442149](https://orcid.org/0009-0002-6203-441X), SPIN-code: [9993-4937](https://orcid.org/0009-0002-6203-441X), johnkarcev@gmail.com

Author have read and approved the final manuscript.

Submitted 09.12.2024; revised 24.12.2024; accepted 09.01.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.225-242>EDN: <https://elibrary.ru/jyxmej>

УДК 001.891.57:621

Оригинальная статья / Original article

Моделирование и методика исследования процесса транспортирования сыпучей среды шнековыми транспортерами

А. В. Бутовченко[✉], А. П. Копейкина, Д. Е. Бастрыкина,
М. А. Чеботарёв, Ф. Ю. Жигайлов

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

[✉] butovchenkoav@yandex.ru

Аннотация

Введение. Рост производительности современных сельскохозяйственных машин не возможен без использования более производительных транспортирующих рабочих органов. В связи с этим одной из актуальных задач машиностроения является создание транспортирующих рабочих органов не только с высокой производительностью, но и оптимальными геометрическими параметрами, влияющими на процесс транспортировки. Однако отсутствует обоснованная методика моделирования и оценки эффективности перемещения сыпучего материала шнековыми транспортерами, позволяющая определить наиболее оптимальный конструктивный вариант на стадии проектирования.

Цель исследования. Обоснование методики моделирования и исследования процесса транспортирования сыпучей среды шнековыми транспортерами.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования взята система выгрузки зерноуборочного комбайна. Представлена методика формирования цифровой модели системы транспортирования с возможностью имитационного моделирования процесса перемещения сыпучей среды методом дискретно-элементного моделирования.

Результаты исследования. Предложена и обоснована методика сравнительной оценки эффективности транспортирования сыпучей среды шнековыми транспортерами с учетом возможности широкой вариации технологических свойств сыпучей среды, поступающей на транспортирование, и кинематических режимов работы, позволяющих проводить сравнение различных вариантов и выявлять наиболее эффективный вариант по критерию минимизации совокупного пути перемещения отдельных частиц и минимальной удельной затрачиваемой мощности на перемещение.

Обсуждение и заключение. Полученная методика может быть использована для разработки новых и оценки эффективности функционирования существующих транспортирующих шнековых рабочих органов. Она позволяет более широко проводить анализ технологического процесса перемещения сыпучей среды, в том числе выгрузки зерновой массы из зерноуборочного комбайна.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, дискретно-элементное моделирование, шнек, зерно, траектория частиц, цифровая модель процесса транспортирования шнеком

© Бутовченко А. В., Копейкина А. П., Бастрыкина Д. Е.,
Чеботарёв М. А., Жигайлов Ф. Ю., 2025



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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бутовченко А.В., Копейкина А.П., Баstryкина Д.Е., Чеботарёв М.А., Жигайлов Ф.Ю. Моделирование и методика исследования процесса транспортирования сыпучей среды шнековыми транспортерами. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):225–242. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.225-242>

Simulation and Research Methodology for the Process of Conveying Bulk Materials by Screw Conveyors

A. V. Butovchenko , A. P. Kopeikina, D. E. Bastrykina,
M. A. Chebotarev, F. Yu. Zhigailov
*Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russian Federation*

 butovchenkoav@yandex.ru

Abstract

Introduction. Increase in the performance of modern agricultural machines is not possible without the use of more powerful conveying working tools. In this regard, one of the topical problems of mechanical engineering is the development of conveying working tools not only with high performance, but also with optimal geometric parameters affecting the conveying process. However, there is no validated methodology for simulation and evaluation of the efficiency of bulk material movement by screws conveyors, which would allow determining the most optimal design variant at the design stage.

Aim of the Study. The study is aimed at justifying the methods for simulating and studying the process of conveying bulk materials by screw conveyors

Materials and Methods. The object of the study was an unloading system of a combine harvester. There is presented the methodology of developing a digital model for the conveying system with the possibility of simulating the bulk material movement process through using discrete-element simulation.

Results. There have been proposed and justified the methodology for comparative estimation of the efficiency of conveying bulk material by screw conveyors. There were taken into account the possibility of wide variation of technological properties of bulk materials coming for conveying and of operation kinematic modes allowing the comparison of different variants and selection of the most effective variant by the criterion of minimization of the aggregate path for movement of separate particles and minimum specific power consumption for movement.

Discussion and Conclusions. The obtained methodology can be used to develop new and evaluate the efficiency of existing conveying working tools of screw-type. This methodology allows making a wider analysis of the technological process of conveying bulk materials, including the unloading of grain mass from the combine harvester.

Keywords: combine harvester, discrete element simulation, screw, grain, particle trajectory, digital model of the screw conveying process

Acknowledgements: 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: Butovchenko A.V., Kopeikina A.P., Bastrykina D.E., Chebotarev M.A., Zhigailov F.Yu. Simulation and Research Methodology for the Process of Conveying Bulk Materials by Screw Conveyors. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):225–242. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.225-242>

Введение. Зерноуборочный комбайн является одним из основных средств механизации в процессе уборки зерновых культур. На эффективность процесса выгрузки из бункера комбайна убранного урожая большое влияние оказывают физико-механические свойства зернового вороха и геометрические, кинематические параметры выгрузного устройства. Нарушения в технологическом процессе выгрузки приводят к остановке всего процесса уборки, простоя комбайна, увеличению сроков уборки и дополнительным потерям урожая.

Шнековые транспортеры являются одними из эффективных рабочих органов, обладающих высокой степенью надежности выполнения технологического процесса транспортирования, что обуславливает их разностороннее применение, в том числе и в зерноуборочных комбайнах. Система транспортирования зернового материала внутри зерноуборочного комбайна, а также процесс его выгрузки является важной частью работы комбайна. В зависимости от геометрических и конструктивных параметров, кинематических режимов функционирования формируется эффективность его работы, определяются качественные и количественные характеристики процесса транспортирования, а именно повреждения транспортируемого материала, мощность, расходуемая на его перемещение, и затраты энергии на транспортировку. Также при работе на повышенных скоростях и нагрузках происходит высокий износ как элементов шнековых транспортеров, так и их привода, что может приводить к поломкам, провоцирующим простой техники и снижение маржинальности всего технологического процесса производства продукции растениеводства.

Для моделирования и исследования процесса перемещения сыпучей среды шнековыми транспортерами необходимо создание цифровых моделей систем транспортирования, проведение сравнительного анализа их функционирования и последующая оптимизация их работы под конкретные характеристики технологического процесса с учетом широкой вариации технологических свойств сыпучей среды, поступающей на транспортировку. Данные методики позволяют более глубоко проводить анализ процесса транспортировки за счет наблюдения за визуализацией работы его цифрового двойника и получения цифровой информации о процессе и последующей его оптимизации.

В качестве критерия эффективности процесса перемещения предлагается использовать мощность, необходимую для перемещения заданного материала. Однако существующие методики по определению необходимой мощности не учитывают ряд параметров, связанных с широкой вероятностью свойств сыпучей среды, поступающей на транспортирование, различиями траекторий каждой отдельно взятой транспортируемой частицы (форма частиц, размерные характеристики, наличие примесей, фракционного состава, взаимоперемещение материала внутри системы) и с потерями, связанными с внутренним трением частиц друг об друга и колебанием материала относительно гравитационных сил. Нами предлагается усовершенствованная методика, позволяющая учесть данные факторы при создании новых и оптимизации уже существующих шнековых систем транспортирования.

Целью исследования является разработка и обоснование методики, позволяющей оценивать эффективность работы шнековых систем транспортирования в зависимости от свойств транспортируемой сыпучей среды.

Обзор литературы. Транспортировка продуктов в шнековых устройствах представляет сложный процесс, поэтому его математическое описание довольно затруднительно.

На стадии проектирования производительность шнеков принято определять в большинстве случаев, используя зависимость¹:

$$Q = 47,1 \left[(D + 2\lambda)^2 - d^2 \right] S \psi n \gamma c,$$

где D – наружный диаметр винта, м; d – диаметр вала винта, м; λ – радиальный зазор между наружной кромкой винта и внутренней поверхностью кожуха шнека, м; S – шаг витков, м; ψ – коэффициент заполнения; n – число оборотов винта в минуту; γ – объемный вес перемещаемого материала, т/м³; c – коэффициент снижения производительности в зависимости от наклона шнека.

Существующая модель дает достаточно приближенные значения, так как не учитывает существенное количество конструктивных параметров шнековых транспортеров и свойств транспортируемой сыпучей среды (коэффициент трения сыпучей среды о поверхность трубы, вала и спирали шнека; коэффициенты статического и динамического трения частиц сыпучей среды; силы адгезии, действующие между частицами и между частицами и поверхностью; диссипативные силы взаимодействия; наличие примесей других частиц; форма частиц и т. д.), отдельное и совокупное влияние которых существенно изменяет процесс транспортирования.

При проектировании шнековые транспортеры принято разделять условно на четыре группы в зависимости от угла наклона: горизонтальные, имеющие малый наклон (до 20°), имеющие большой наклон к горизонту (от 20° до 90°) и вертикальные. В настоящее время существуют стандарты для винтовых конвейеров: ГОСТ 2037-82², DIN 15261 в двух частях³, DIN 15262-1983⁴ – эквивалент стандарта ISO 7119-1981⁵. Данные стандарты имеют различные методики для расчета параметров шнековых транспортеров.

Исследованием процесса транспортирования занимались следующие ученые: О. А. Старовойтова и др. [1] занимались описанием физического процесса движения корнеплодов в вертикальном шнеке; З. А. Меретукова и др. [2; 3] определением производительности транспортера со спиральным шнеком; Л. Г. Крючкова [4] вычислением потребляемой мощности на процесс транспортирования; Д. С. Беленко и А. Б. Мишин [5] исследовали факторы, влияющие на скорость перемещения

¹ Справочник конструктора сельскохозяйственных машин / под ред. М. И. Клецкин. 4 т. М. : Машиностроение, 1967. Т. 1. 722 с.

² ГОСТ 2037-82. Конвейеры винтовые стационарные общего назначения. Общие технические условия. М. : Издательство стандартов, 1982.

³ DIN 15261-1-1986. Continuous Mechanical Handling Equipment for Loose Bulk Materials; Screw Conveyors; Mating Dimensions [Электронный ресурс]. URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/4027408.aspx> (дата обращения: 23.09.2024); DIN 15261-2-1986. Continuous Mechanical Handling Equipment for Loose Bulk Materials; Screw Conveyors; Helical Screw Blade [Электронный ресурс]. URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/4023257.aspx> (дата обращения: 23.09.2024).

⁴ DIN 15262-1983. Continuous Mechanical Handling Equipment; Screw Conveyors for Loose Bulk Materials; Design Principles [Электронный ресурс]. URL: <https://www.standards.ru/document/4038442.aspx> (дата обращения: 23.09.2024).

⁵ ISO 7119-1981. Continuous Mechanical Handling Equipment for Loose Bulk Materials – Screw Conveyors – Design Rules for Drive Power [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3KHfww> (дата обращения: 23.09.2024).

материала по шнеку; Yuan Tan, Sumira Rashid, Hongbin Liu и др. [6–8] проводили теоретические расчеты параметров транспортирования; M. S. Wang, L. Mei, М. Г. Загоруйко и др. [9–11] проводили имитационное моделирование процесса транспортирования и параметров работы шнеков различных конструкций. При этом анализ данных работ показал, что методика определения производительности и эффективности функционирования шнековых транспортирующих устройств недостаточно универсальна. При описании технологического процесса используются аналитические зависимости, полученные на основании сил, действующих на единичную частицу. Также установлено отсутствие методики определения эффективности функционирования и определения расчетных характеристик для шнековых транспортирующих систем с вращающимся кожухом [12].

Более совершенным для описания процесса транспортировки сыпучей среды является метод дискретных элементов (DEM – Discrete Element Method), имеющий широкое применение в моделировании процессов функционирования рабочих органов сельскохозяйственных машин [13] и позволяющий учитывать не только влияние геометрии транспортирующего рабочего органа (шнека), но взаимовлияние транспортируемых частиц [14; 15].

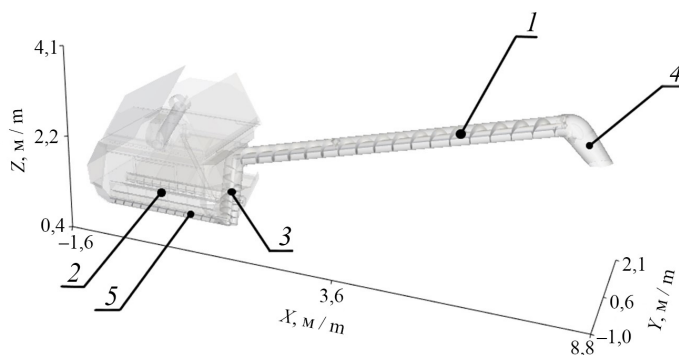
Данный метод для моделирования процесса транспортировки был использован в разных работах. Ученые [16; 17] исследовали влияние производительности винтового конвейера с помощью метода дискретных элементов. В результате работы было установлено, что DEM моделирование позволяет прогнозировать производительность с точки зрения изменения скорости частиц, степени заполнения, массового расхода, рассеиваемой энергии и потребляемой мощности. Однако в данном исследовании использовались только сферические частицы. Научные коллективы под руководством Z. Ma, S. N. Traore, Yo. Zhu и др. [18; 19], исследовали разгрузку зернового бункера комбайна для уборки риса. С помощью DEM моделирования они определили массовый расход шнеком, который был подтвержден экспериментально. G.-J. Lee, T.-H. Kwon [20] исследовали выгрузку шлама через систему винтовых конвейеров. Ученые рассматривали различные способы задания форм частиц с помощью сферических и мультисферных моделей, а также работу шнека с различным шагом спирали. Исследования показали, что увеличение размера частиц приводит к снижению скорости выгрузки как для сферических частиц, так и для мультисферных частиц приближенной формы. Также в данном исследовании приводится возможность визуализации траектории отдельных частиц. Однако возможность численного анализа данных траекторий отсутствует. L. Sun и др. [21] исследовали влияние наклона спирали шнека на его производительность с использованием DEM моделирования и применения мультисферных частиц. A. Li и др. [22] изучали влияние скорости вращения вертикального шнека и поведение потоков зерна в нем. В работе [23] учеными исследовались динамические характеристики направленного потока материала при перемещении его горизонтальным безжелобовым конвейером. E. Kalay [24], Ya. Lv [25] использовали искусственный интеллект и нейросети для прогнозирования производительности шнекового конвейера. Также важным фактором при проектировании рабочих органов, участвующих в транспортировке, является учет

повреждений зерна в процессе уборки [26–28] и транспортировки шнековыми транспортерами [29–31].

С помощью анализа существующих исследований выявлена необходимость формирования общей методики оценки эффективности процесса транспортирования сыпучей среды с использованием шнековых транспортеров путем анализа полученных средних значений коэффициентов пути пройденного частицей к необходимой длине пути, а также затрачиваемой на процесс транспортирования мощности.

Материалы и методы. Для моделирования и исследования процесса перемещения сыпучей массы за основу был взят метод дискретно-элементного моделирования. Данный метод, разработанный Cundall и Strack в 1979 г. [32], позволяет моделировать поток отдельных частиц, имеющих свои собственные размерные характеристики и физико-механические свойства. При перемещении частиц во время моделирования учитываются нормальные и тангенциальные силы, силы гравитации, трения (как между отдельными частицами, так и между частицами и геометрией), имеющие теоретическое обоснование применения [33–35] и верифицированные с использованием лабораторного оборудования [36; 37]. Использование данного метода позволит определить координаты каждой частицы в заданный момент времени, с помощью которых можно построить траектории их перемещения и оценить во сколько раз реальная длина пути, пройденного частицей, отличается от линейной (оптимальной) длины пути в зависимости от свойств транспортируемой сыпучей среды. Коэффициент отношения полного пути, пройденного частицей, к пути вдоль оси шнека позволит оценить эффективность процесса транспортирования.

В качестве объекта исследования выбрана система выгрузки зерноуборочного комбайна, представленная на рисунке 1. Данная система имеет в своем составе горизонтальный шнек 5, вертикальный шнек 3 и горизонтальный выгрузной шнек 1.



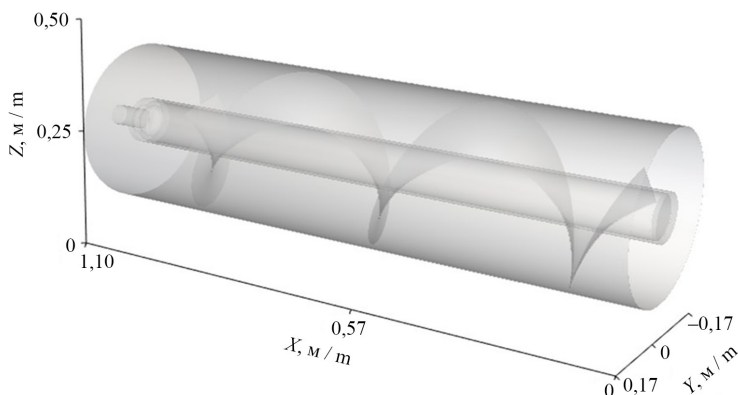
Р и с. 1. Модель системы выгрузки зерноуборочного комбайна:
1 – выгрузной шнек; 2 – корпус бункера зерноуборочного комбайна; 3 – вертикальный шнек;
4 – выгрузной раструб; 5 – горизонтальный шнек

F i g. 1. The model of the combine harvester unloading system:
1 – unloading auger; 2 – combine harvester hopper housing; 3 – vertical auger;
4 – unloading auger; 5 – horizontal auger

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

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

Для отработки методики исследования процесса перемещения сыпучего материала с целью сокращения машинного расчетного времени при необходимости проведения большого количества итерационных расчетов на начальном этапе за основу взяли область горизонтального выгрузного шнека длиной 1 140 мм (рис. 2). Данная область имеет следующие характеристики: наружный диаметр спирали 200 мм; диаметр вала 50 мм; шаг спирали 200 мм; частота вращения шнека 586 мин^{-1} . Количество транспортируемого материала соответствовало производительности 10 кг/с.



Р и с. 2. Исследуемая модель секции выгрузного шнека
F i g. 2. Experimental model of the discharge screw conveyor

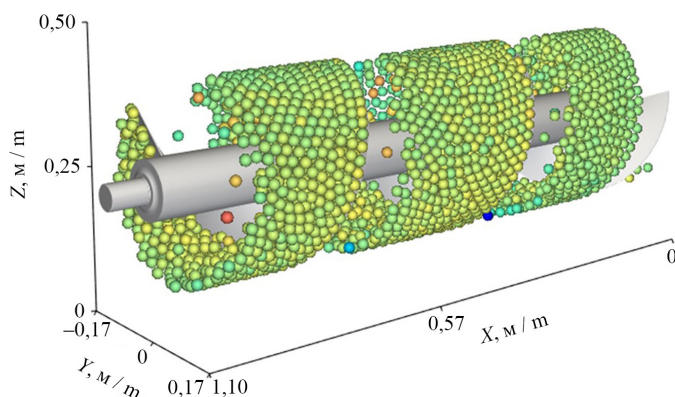
Моделирование процесса транспортирования сыпучей среды осуществлялось с использованием сферических частиц диаметром 8 мм. Физико-механические свойства транспортируемых сельскохозяйственных культур имеют отличия, которые учитывались при постановке задачи и соответствовали эквивалентным свойствам убираемых и транспортируемых культур [33; 38] (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Модели частиц, используемые в DEM
Particle models used in DEM

Зерновая культура / Cereal crop	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley	Кукуруза / Corn	Рожь / Rye	Овес / Oats
Насыпная плотность, кг/м^3 / Bulk density, kg/m^3	770	675	750	675	450
Модуль Юнга, МПа / Young's modulus, MPa	420	440	315	250	275
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio	0,420	0,20	0,400	0,19	0,18
Коэффициент статического трения о сталь / Coefficient of static friction on steel	0,445	0,39	0,438	0,28	0,35

Используя прикладное программное обеспечение для дискретно-элементного моделирования, на начальном этапе провели моделирование для частиц со свойствами эквивалентными свойствам пшеницы. В результате моделирования получена визуализация процесса перемещения транспортируемых частиц (рис. 3), позволяющая определить координаты каждой частицы в заданный момент времени, что в свою очередь позволило определить путь, пройденный частицей за каждый временной промежуток, и построить траектории движения для каждой отдельно взятой частицы. Пример координат частицы в заданные моменты времени и ее траектория приведены в таблице 2 и на рисунке 4.



Р и с. 3. Стоп-кадр процесса перемещения частиц пшеницы
F i g. 3. Freeze frame of wheat particle movement process

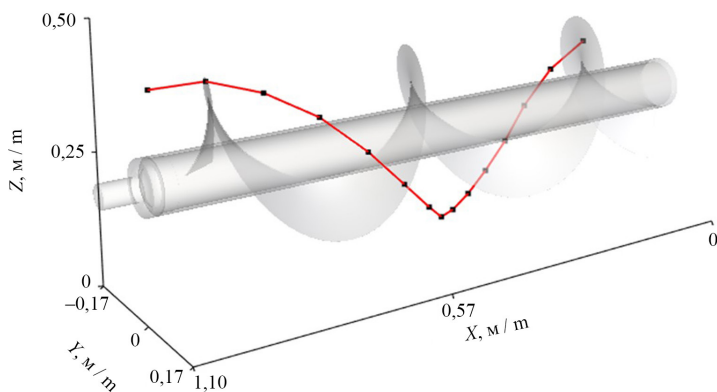
Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Координаты траектории частицы пшеницы
Coordinates of the wheat particle trajectory

Координата частицы X, м / Particle coordinate X, m	Координата частицы Y, м / Particle coordinate Y, m	Координата частицы Z, м / Particle coordinate Z, m	Длина пути, пройденного частицей, м / Length of the path traveled by the particle, m
1	2	3	4
0,081360861	−0,149816303	0,314328369	0
0,153568341	−0,162920209	0,259280225	0,091738382
0,226103974	−0,153106865	0,193523755	0,190133672
0,299261129	−0,119214529	0,138617870	0,287680154
0,380574551	−0,074177230	0,104766537	0,386605092
0,458907487	−0,024313847	0,088739165	0,480835038
0,531887298	0,026591400	0,088958756	0,569815064
0,601040518	0,085609232	0,111095095	0,663384770
0,666501667	0,138604630	0,163941578	0,762815273

Окончание табл. 2 / End of table 2

1	2	3	4
0,735978291	0,161927366	0,229791737	0,861340371
0,804561642	0,155195057	0,300465684	0,960051094
0,875092890	0,117179112	0,363563034	1,062037095
0,945965647	0,059910511	0,401827573	1,160864295
1,012826655	−0,012600411	0,412645043	1,260087507
1,081583013	−0,087486217	0,387709358	1,364763718



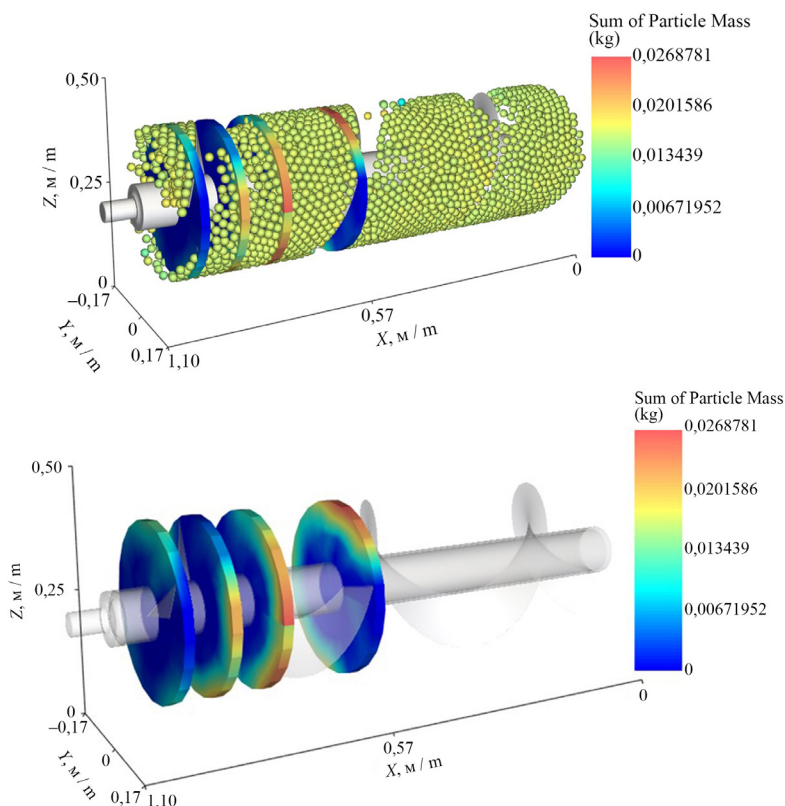
Р и с. 4. Траектория частицы пшеницы по длине шнека

Fig. 4. The trajectory of wheat particles along the length of the screw

Использование данного дискретно-элементного моделирования применительно к процессу транспортирования сыпучей среды с широкой вариацией технологических свойств позволило визуализировать сам процесс, а также получить информацию о перемещении каждой частицы.

Результаты исследования. В результате моделирования получены координаты транспортируемых частиц в заданные промежутки времени, позволившие построить данные траектории в виде трехмерных графиков и вычислить среднюю длину пути, пройденного частицами. Анализ данных траекторий показал отличные по длине средние значения траекторий перемещения частиц транспортируемой сыпучей среды, имеющих различные исходные физико-механические свойства, соответствующие убираемым и транспортируемым сельскохозяйственным культурам. Расчетная средняя длина пути, пройденная частицами отличающимися физико-механическими свойствами в исследуемой секции выгрузного шнека, составила для пшеницы – 1,581 м, ячменя – 1,557 м, кукурузы – 1,764 м, ржи – 1,564 м, овса – 1,595 м.

В процессе транспортирования частицы не равномерно распределяются по объему, образуются микроводы, поэтому для получения лучшего представления о процессе перемещения использовали Эйлеровую статистику, позволяющую визуализировать суммарную массу частиц, проходящих в задаваемых для исследования сечениях. Результаты применения данного инструмента визуализации для оценки распределения частиц по сечениям представлены на рисунке 5.



Р и с. 5. Сумма массы частиц пшеницы в различных сечениях

F i g. 5. The sum of the mass of wheat particles according to Eulerian statistics

Поведение частицы транспортируемой сыпучей среды можно описать через уравнения траектории ее движения. Существуют различные методики описания данных траекторий. В первом варианте траекторию движения частицы (рис. 4), которая визуальнo представляет собой синусоиду, опишем системой математических уравнений, используя следующий вид шаблонной функции:

$$\begin{cases} y = A \cdot \cos(F(x)) \\ z = A \cdot \sin(F(x)) \end{cases}$$

где x, y, z – координаты точек траектории движения частицы, м; A – безразмерный коэффициент.

По гипотезе оптимальная траектория частицы должна быть близка к линейной, поэтому последовательно рассмотрены три ее возможных варианта:

$$\begin{aligned} F(x) &= B + Cx; \\ F(x) &= B + Cx + Dx^2; \\ F(x) &= B + Cx + Dx^2 + Ex^3. \end{aligned}$$

где x – координата траектории частицы, м; A, B, C, D, E – безразмерные коэффициенты.

Качество аппроксимации было проверено по двум показателям: коэффициенту корреляции и среднеквадратичному отклонению в узловых точках. В данном случае под узловыми точками были приняты расчетные координаты точек движения частицы в заданные промежутки времени, представленные в таблице 2. Для нахождения коэффициентов модели A, B, C, D, E воспользовались эквивалентным методом, состоящим в минимизации невязки:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - A \cdot \cos(F(x_i)))^2 + (z_i - A \cdot \sin(F(x_i)))^2 \rightarrow \min.$$

После проведения вычислений с использованием Mathcad для уравнений было установлено, что наиболее оптимально данную траекторию можно описать аппроксимирующей функцией:

$$\begin{cases} y = 0,14405 \cdot \cos(-1,9481 + 7,4981x) \\ z = 0,14405 \cdot \sin(-1,9481 + 7,4981x). \end{cases}$$

Коэффициент корреляции при этом составил 0,996.

Во втором варианте траекторию движения частицы, представленную на рисунке 4, можно описать с помощью уравнения, полученного на основе кубической регрессии:

$$\begin{aligned} z = & -2,772x + 1,773y - 7,516x^2 + 2,047xy + 3,632y^2 - \\ & - 4,968x^3 - 1,642x^2y + 7,48xy^2 - 3,662y^3 - 0,113. \end{aligned}$$

Коэффициент корреляции при этом составил 0,9998.

В обоих вариантах получены близкие по значению коэффициенты корреляции. Следовательно, оба подхода для описания траектории частицы являются равнозначными.

Для определения эффективности процесса транспортирования частиц был использован коэффициент отношения полного пути, пройденного частицей к пути вдоль оси шнека:

$$k = \frac{l}{S},$$

где l – среднее значение полной длины пути, пройденного частицей, м; S – путь частицы, пройденный вдоль оси шнека, м.

Для сферических частиц со свойствами эквивалентными свойствам пшеницы средняя длина пути l составила 1,581 м (табл. 3), при этом путь вдоль оси шнека S составил 1,14 м (данное значение соответствует длине исследуемой секции и максимальной координате X):

$$k = \frac{1,581}{1,14} = 1,387.$$

Используя данную методику, был определен коэффициент отношения пройденного пути к пути вдоль оси для сферических частиц со свойствами эквивалентными свойствам других культур.

Таблица 3

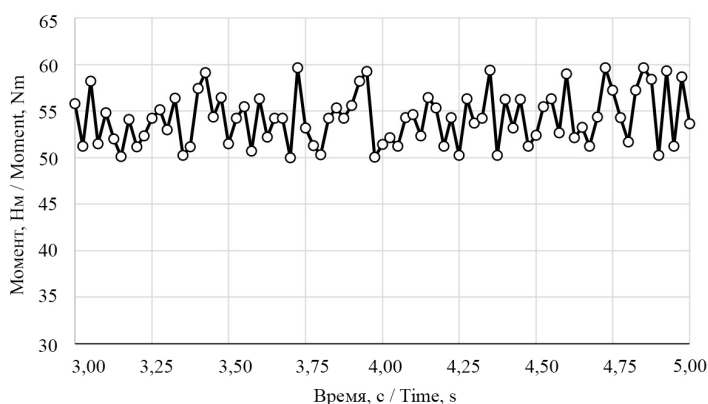
Table 3

Коэффициенты отношения пройденного пути к пути вдоль оси
Coefficients of the ratio of the traveled path to the path along the axis

Культура / Crop	Среднее значение длины пути, пройденного частицей l , м / Average value of the path length traveled by the particle l , m	k
Пшеница / Wheat	1,581	1,387
Ячмень / Barley	1,557	1,366
Кукуруза / Corn	1,764	1,548
Рожь / Rye	1,564	1,372
Овес / Oats	1,595	1,399

Анализ результатов моделирования показал, что при одинаковой частоте вращения шнека, но разных физико-механических свойствах длина пути частиц одного размера будет различна, следовательно, энергия для перемещения этих частиц также будет отличаться.

Существующие методики определения мощности основаны на аналитическом определении мощности, необходимой на транспортировку сыпучей среды шнековыми транспортирующими устройствами. Однако данные зависимости не учитывают широкую вероятность свойств транспортируемого материала, особенности геометрии и условий эксплуатации, а также длину траектории пути, пройденного частицей. При моделировании процесса транспортирования с использованием метода дискретно-элементного моделирования возможно получить значения крутящего момента, действующие на привод шнека. Пример полученных расчетных значений в заданном исследуемом промежутке времени представлен на рисунке 6. Используя данные значения, можно определить среднее значение $\bar{M}$ крутящего момента, действующего на привод шнека. Полученные расчетные средние значения крутящего момента по культурам с различными физико-механическими свойствами и траекториями движения представлены в таблице 4.



Р и с. 6. Расчетные значения крутящего момента, приложенного к шнеку при транспортировке пшеницы в промежутке времени исследования

Fig. 6. Calculated values of torque applied to the screw during wheat transportation in the study time interval

Необходимую на привод шнека мощность при транспортировке зерновой массы различных культур определим, используя следующее выражение:

$$P = \frac{n \cdot \bar{M}}{9550},$$

где $\bar{M}$ – среднее значение крутящего момента за исследуемый промежуток времени, Нм; n – частота вращения, мин⁻¹.

Определим мощность, необходимую на привод шнека при транспортировке пшеницы:

$$P = \frac{586 \cdot 54,3}{9550} = 3,33 \text{ кВт}.$$

Аналогичным образом определена расчетная мощность на привод шнека для транспортировки других культур. Полученные значения приведены в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

Table 4

Среднее значение крутящего момента и мощности, необходимой на привод шнека, в зависимости от транспортируемой культуры

Average torque and power required to drive the screw depending on the crop being transported

Культура / Crop	Среднее значение крутящего момента $\bar{M}$, Нм / Average torque value $\bar{M}$, Nm	Мощность на привод шнека P , кВт / Power for the screw drive P , kW
Пшеница / Wheat	54,30	3,33
Ячмень / Barley	43,78	2,69
Кукуруза / Corn	70,89	4,34
Рожь / Rye	50,10	3,07
Овес / Oats	59,10	3,63

В результате исследования процесса транспортирования были получены средние расчетные значения длины траекторий частиц в зависимости от их физико-механических свойств. Используя значения координат характерных точек траектории одной из частиц пшеницы, были получены два вида уравнений, равнозначно описывающих характер движения исследуемой частицы в зависимости от ее физико-механических свойств, геометрических размеров и кинематических режимов функционирования шнекового транспортера. Полученные в результате имитационного моделирования данные позволили определить мощность, затрачиваемую на перемещение частиц с различными физико-механическими свойствами.

Обсуждение и заключение. Предлагаемая методика исследования транспортирования сыпучей среды шнеком с учетом влияния физико-механических свойств зерновых культур на процесс транспортировки выгрузным шнеком зерноуборочного комбайна позволяет учитывать разнообразные факторы, включая форму, состав и размеры зерна, геометрические и кинематические особенности шнека, угол его установки, заполненность шнека транспортируемым материалом, а также потери энергии при взаимодействии частиц. Данная методика существенно повышает точность получаемой при моделировании информации. Такой подход позволяет

оценивать продуктивность процесса транспортировки и разрабатывать более эффективные конструкции оборудования.

Использование данного подхода позволило провести моделирование процесса транспортирования шнеком зернового вороха, имеющего различные физико-механические свойства. В результате моделирования были получены средние значения траекторий транспортируемых частиц в исследуемом участке шнека длиной 1 140 мм, наружным диаметром спирали 200 мм, диаметром вала 50 мм, шагом спирали 200 мм. Частота вращения шнека составила 586 мин^{-1} при расчетной производительности 10 кг/с. Используя средние значения траекторий пройденного пути, были определены коэффициенты отношения пройденного пути к пути вдоль оси для сферических частиц со свойствами эквивалентными свойствам других культур: для пшеницы – 1,387; ячменя – 1,366; кукурузы – 1,548; ржи – 1,372; овса – 1,399. Анализ значений данных коэффициентов показывает, что путь, проходимый частицей, больше необходимого в 1,366–1,548 раз. Полученные в процессе моделирования значения крутящего момента позволили определить расчетную мощность, необходимую на привод шнека и составившую для пшеницы 3,33 кВт; ячменя – 2,69 кВт; кукурузы – 4,34 кВт; ржи – 3,07 кВт; овса – 3,63 кВт. Анализ полученных значений позволяет выявить взаимосвязь коэффициента отношения пройденного пути к пути вдоль оси и необходимой на процесс транспортирования мощности. Чем больше коэффициент, тем выше необходимая на транспортирование мощность. Предложенная методика может быть использована для сравнительной оценки шнеков, имеющих различные конструктивные характеристики, или при транспортировании сыпучей среды с разными физико-механическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Брусенков А.В., Капустин В.П. Физическая модель движения корнеплодов в вертикальном шнеке. *Наука в центральной России*. 2021;51(3):47–56. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-3-47-56>
Brusenkov A.V., Kapustin V.P. Physical Model of the Movement of Root Crops in a Vertical Auger. *Science in Central Russia*. 2021;51(3):47–56. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-3-47-56>
2. Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Верещагин А.Г., Следь Н.И. Производительность транспортера со спиральным шнеком. *Новые технологии*. 2011;(1). URL: <https://lib.mkgtu.ru/images/stories/journal-nt/2011-01/004.pdf> (дата обращения: 25.05.2024).
Meretukov Z.A., Koshevoi E.P., Kosachev V.S., Vereshchagin A.G., Sled' N.I. Productivity of a Conveyor with a Spiral Auger. *New Technologies*. 2011;(1). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://lib.mkgtu.ru/images/stories/journal-nt/2011-01/004.pdf> (accessed 25.05.2024).
3. Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Следь Н.И., Косачев В.С., Верещагин А.Г. Моделирование структуры потоков в транспортере со спиральным шнеком. *Новые технологии*. 2011;(1). URL: <https://reader.lanbook.com/journalArticle/132528> (дата обращения: 25.05.2024).
Meretukov Z.A., Koshevoy E.P., Kosachev V.S., Vereshchagin A.G., Sled' N.I. Modelling of Flow Structure in the Spiral Auger Conveyors. *New Technologies*. 2011;(1). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://reader.lanbook.com/journalArticle/132528> (accessed 25.05.2024).
4. Крючкова Л.Г. Вычисление мощности потребления транспортировочного шнека кормораздатчика. Актуальные вопросы энергетики в АПК: материалы Всеросс. (национальной) науч.-практ. конф. (15 декабря 2022 г., г. Благовещенск). Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2019:156–161. https://doi.org/10.22450/9785964205777_156

- Kryuchkova L.G. Calculation of the Power Consumption of the Transport Screw of the Feed Dispenser. In: Actual Issues of Energy in Agroindustrial Complex: Materials of the All-Russian (National) Scientific-Practical Conference (December 15, 2022). Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University; 2019. p. 156–161. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.22450/9785964205777_156
5. Беленко Д.С., Мишин А.Б. Факторы, влияющие на скорость перемещения материала по шнеку. *Colloquium-Journal*. 2020;85(33):67–69. <https://doi.org/10.24412/2520-2480-2020-3385-67-69>
Belenko D.S., Mishin A.B. Factors Affecting the Speed of Material Movement Along the Screw. *Colloquium-Journal*. 2020;85(33):67–69. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2520-2480-2020-3385-67-69>
 6. Tan Yu., Rackl M., Yang W., Fottner J., Meng W., Kessler S. A Comparative Study on Design Standards of Screw Conveyors in China Germany and the USA – Part I: Theoretical Calculation and Quantitative Analysis. *Particuology*. 2022;69:61–76. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.11.011>
 7. Rashid S., Bashir O., Majid I. Chapter Nine – Different Mechanical Conveyors in Food Processing. *Transporting Operations of Food Materials Within Food Factories. Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. 2023:253–263. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818585-8.00007-6>
 8. Liu H., Li P., Xiao H., Mu W. The Fluid – Solid Coupling Analysis of Screw Conveyor in Drilling Fluid Centrifuge Based on ANSYS. *Petroleum*. 2015;1(3):251–256. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.07.009>
 9. Wang M.S., Jia X.D., Lv W.Y., Sun W.H., Bai F.X., Guo H. Failure Analysis of Screw Shaft in Screw Compressor. *Engineering Failure Analysis*. 2021;125:105424. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105424>
 10. Mei L., Cheng C., Tan X., Fan Z., Liang X. Simulation of Horizontal Double Head Screw Conveyor Based on EDEM. *Advances in Mechanical Design*. 2021;111. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7381-8_87
 11. Загоруйко М.Г., Васильчиков В.В., Мамахай А.К. Имитационное моделирование параметров шнека экструдера. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020;14(4):71–77. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77>
Zagoruiko M.G., Vasilchikov V.V., Mamakhai A.K. Simulation of the Extruder Screw Parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(4):71–77. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-4-71-77>
 12. Смахунов Е.А., Бутовченко А.В., Рукасов К.В. Определение характеристик модифицированного шнека. Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса : юбилейный сборник научных трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 90-летию Донского государственного технического университета, в рамках XXIII Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаш». В 2 т. (26 – 28 февраля 2020 г., г. Ростов-на-Дону). Ростов-на-Дону : ДГТУ-ПРИНТ, 2020. Т. 2. С. 155–160. <https://doi.org/10.23947/interagro.2020.2.155-160>
Smekhunov E.A., Butovchenko A.V., Rukasov K.V. Determination of Characteristics of the Modified Auger. In: State and Prospects of Development of Agroindustrial Complex: Anniversary Collection of Scientific Papers of the XIII International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the Don State Technical University, within the XXIII Agroindustrial Forum of the South of Russia and the Exhibition “Interagromash” (February 26 – 28, 2020). Rostov-on-Don: DGTU-PRINT; 2020. Vol. 2. p. 155–160. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23947/interagro.2020.2.155-160>
 13. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review. *Agriculture*. 2021;11(5):425. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>
 14. Chen Z., Wassgren C., Ambrose K. A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*. 2020;63(2):455–475. <https://doi.org/10.13031/trans.13643>
 15. Chen Z., Wassgren C., Ambrose K. Measured Damage Resistance of Corn and Wheat Kernels to Compression, Friction, and Repeated Impacts. *Powder Technology*. 2020;380:638–648. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.012>

16. Owen P.J., Cleary P.W. Prediction of Screw Conveyor Performance Using the Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology*. 2009;193(3):274–288. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.012>
17. Owen P.J., Cleary P.W. Screw Conveyor Performance: Comparison of Discrete Element Modelling with Laboratory Experiments. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*. 2010;10(5–6). <https://doi.org/10.1504/PCFD.2010.035366>
18. Ma Z., Wu Z., Li Yu., Song Z., Yu J., Li Ya., et al. Study of the Grain Particle-Conveying Performance of a Bionic Non-Smooth-Structure Screw Conveyor. *Biosystems Engineering*. 2024;238:94–104. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.01.005>
19. Ma Z., Traore S.N., Zhu Y., Li Y., Xu L., Lu E., et al. DEM Simulations and Experiments Investigating of Grain Tank Discharge of a Rice Combine Harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;198:107060. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107060>
20. Lee G.-J., Kwon T.-H. Discharge Behavior of Spherical and Rock Chip Mucks by Screw Conveyors in TBM: Physical Model Experiments and DEM Simulations. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2023;142:105407. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105407>
21. Sun L., Zhang X., Zeng Q., Gao K., Jiang K., Zhou J. Application of a Screw Conveyor with Axial Tilt Blades on a Shearer Drum and Investigation of Conveying Performance Based on DEM. *Particuology*. 2022;61:91–102. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.001>
22. Li A., Jia F., Han Ya., Chen P., Zhang J., Wang Y., et al. Effect of the Rotational Speeds of the Screw Conveyor and Milling Roller on the Behaviour of Grain Flows in the Connected Chamber of a Vertical “Conveying-Milling” Rice Mill. *Biosystems Engineering*. 2022;224:161–182. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.10.009>
23. Ren H., Meng W., Sun X., Zhao Z., Zhao X. Discrete Element Analysis on Dynamic Characteristics of Directional Material Flow Driven by Horizontal Trough-Free Screw Conveyor. *Powder Technology*. 2023;418:118276. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118276>
24. Kalay E., Boğaçlı M.E., Bolat B. Mass Flow Rate Prediction of Screw Conveyor Using Artificial Neural Network Method. *Powder Technology*. 2022;408:117757. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117757>
25. Lv Ya., Lin L., Fu S., Guo H., Zu L., Suo S., et al. A Double-Layer Progressive Architecture-Based Surrogate Model for Efficiency Analysis of Spiral Shaft in Shield Machine. *Automation in Construction*. 2024;160:105298. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105298>
26. Newbery R.S., Paulsen M.R., Nave W.R. Soybean Quality with Rotary and Conventional Threshing. *Transactions of the ASAE*. 1980;23(2):0303–0308. <https://doi.org/10.13031/2013.34575>
27. Paulsen M.R., Nave W.R. Corn Damage from Conventional and Rotary Combines. *Transactions of the ASAE*. 1980;23(5):1100–1116. <https://doi.org/10.13031/2013.34729>
28. Misra M.K., Shyy Y., Baudet L., Marley S.J. Conveyors for Bulk Handling of Seed Soybeans. *Applied Engineering in Agriculture*. 1991;7(6):735–740. <https://doi.org/10.13031/2013.26295>
29. Chen Z., Wassgren C., Tamrakar A., Ambrose R.P.K. Validation of a DEM Model for Predicting Grain Damage in an Industrial-Scale Handling System. *Smart Agricultural Technology*. 2023;5:100274. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274>
30. Zareiforush H., Komarizadeh M.H., Alizadeh M.R. Effects of Crop-Machine Variables on Paddy Grain Damage During Handling with an Inclined Screw Auger. *Biosystems Engineering*. 2010;106(3):234–242. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.02.008>
31. Ахматов А.А., Оробинский В.И., Солнцев В.Н. Травмирование зерна шнековым питающим устройством. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2015;47(4):98–101. <https://elibrary.ru/vauanz>
Akhmatov A.A., Orobinsky V.I., Solntsev V.N. [Traumatization of Grain by a Screw Feeder]. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2015;47(4):98–101. (In Russ.) <https://elibrary.ru/vauanz>
32. Cundall P.A., Strack O.D.L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*. 1979; 29(1):47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
33. Horabik J., Molenda M. Parameters and Contact Models for DEM Simulations of Agricultural Granular Materials: A Review. *Biosystems Engineering*. 2016;147:206–225. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>
34. Sharaby N.N., Doroshenko A.A., Butovchenko A.V. Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(2):219–231. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.219-231>

35. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A. Modelling and Verification of Sesame Seed Particles Using the Discrete Element Method. *Journal of Agricultural Engineering*. 2022;53(2). <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1286>
36. Chen P., Han Y., Jia F., Meng X., Xiao Y., Bai S. DEM Simulations and Experiments Investigating the Influence of Feeding Plate Angle in a Rubber-Roll Paddy Grain Huller. *Biosystems Engineering*. 2021;201:23–41. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.11.003>
37. Fan J., Wang H., Sun K., Zhang L., Wang L., Zhao J., et al. Experimental Verification and Simulation Analysis of a Multi-Sphere Modelling Approach for Wheat Seed Particles Based on the Discrete Element Method. *Biosystems Engineering*. 2024;245:135–151. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.07.009>
38. Miu P. Combine Harvesters: Theory, Modeling, and Design. Boca Raton; 2015. <https://doi.org/10.1201/b18852>

Об авторах:

Бутовченко Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор Института перспективного машиностроения «Ростсельмаш» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9335-9586>, Researcher ID: N-4962-2016, butovchenkoav@yandex.ru

Копейкина Анастасия Павловна, аспирант Института перспективного машиностроения «Ростсельмаш» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9015-0401>, Researcher ID: LTE-5264-2024, kopeikina_bstu@mail.ru

Бастрыкина Дарья Евгеньевна, аспирант Института перспективного машиностроения «Ростсельмаш» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8076-0980>, Researcher ID: LSJ-4507-2024, bastyrykina.dasha.00@mail.ru

Чеботарёв Михаил Андреевич, аспирант Института перспективного машиностроения «Ростсельмаш» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5362-6142>, Researcher ID: LSJ-4505-2024, mchibis1997@gmail.com

Жигайлов Федор Юрьевич, магистрант Института перспективного машиностроения «Ростсельмаш» Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0687-4225>, Researcher ID: LSJ-3558-2024, 3Fedor_Zhigaylov_Sr_3@mail.ru

Вклад авторов:

А. В. Бутовченко – формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств; 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. П. Копейкина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Д. Е. Бастрыкина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

М. А. Чеботарёв – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 26.11.2024; поступила после рецензирования 19.12.2024;
принята к публикации 27.12.2024*

About the authors:

Andrey V. Butovchenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Rostselmash Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9335-9586>, Researcher ID: N-4962-2016, butovchenkoav@yandex.ru

Anastasia P. Kopeikina, Postgraduate Student of the Rostselmash Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9015-0401>, Researcher ID: LTE-5264-2024, kopeikina_bstu@mail.ru

Daria E. Bastrykina, Postgraduate Student of the Rostselmash Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8076-0980>, Researcher ID: LSJ-4507-2024, bastrykina.dasha.00@mail.ru

Mikhail A. Chebotarev, Postgraduate Student of the Rostselmash Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5362-6142>, Researcher ID: LSJ-4505-2024, mchibis1997@gmail.com

Fedor Yu. Zhigailov, Master's Student of the Rostselmash Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0687-4225>, Researcher ID: LSJ-3558-2024, 3Fedor_Zhigaylov_Sr_3@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Butovchenko – formulating the study idea, aims and objectives; conducting the study process, specifically performing the experiments and collecting data/evidence; preparing the article manuscript: critical analysis of the manuscript, and of comments and corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages.

A. P. Kopeikina – conducting the study process, specifically performing the experiments and collecting data/evidence; preparing the manuscript, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

D. E. Bastrykina – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence; preparing the manuscript, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

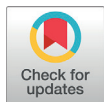
M. A. Chebotarev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence; preparing the manuscript, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

F. Yu. Zhigailov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and obtained data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 26.11.2024; revised 19.12.2024; accepted 27.12.2024

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.243-265>EDN: <https://elibrary.ru/Invooa>

УДК 005.936.31:621

Оригинальная статья / Original article

Экспериментальная оценка параметров двухфазных течений в пневмосистеме посевного комплекса

А. М. Мухаметдинов[✉], С. Г. Мударисов*Башикирский государственный аграрный университет,
г. Уфа, Российская Федерация*[✉] airat102@mail.ru

Аннотация

Введение. В современных посевных комплексах транспортирование и распределение семян и удобрений происходит с помощью воздушного потока. При моделировании технологических процессов работы таких пневматических систем методами вычислительной гидродинамики и дискретных элементов важным этапом является определение параметров межфазного взаимодействия двухфазных течений «воздух – семена» и «воздух – удобрения». От интенсивности межфазного взаимодействия зависят как возможность реализации моделей вычислительными методами, так и сложность используемых моделей.

Цель исследования. Экспериментальная оценка параметров двухфазных течений в пневматической системе посевного комплекса, где в качестве несущей фазы используется поток воздуха, а в качестве дисперсной фазы – смесь твердых частиц гранул удобрений.

Материалы и методы. Исследование проводилось с использованием экспериментальных методов, включающих высокоскоростную видеосъемку, парусный классификатор и цифровые анемометры для анализа параметров воздушного потока и движения частиц. Методика содержала определение влажности материалов, скорости витания частиц, объемной концентрации фаз, а также расчет гидродинамических характеристик в различных участках пневмосистемы. Применялись современные подходы к анализу двухфазных течений с учетом взаимодействия между частицами и стенками транспортных каналов.

Результаты исследования. Эксперименты выявили существенные различия в параметрах течения между горизонтальными и вертикальными участками пневмосистемы. Установлена зависимость аэродинамических характеристик частиц от их физико-механических свойств. Наблюдалось значительное изменение объемной концентрации дисперсной фазы по длине транспортных пневмопроводов посевного комплекса, что указывает на переход между различными режимами течения. Коэффициенты сопротивления частиц демонстрировали четкую корреляцию с критериями подобия, характерными для промежуточной области кривой Рэлея.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования позволили разработать методику оценки параметров двухфазных течений в пневмосистемах и выявить ключевые факторы, влияющие на эффективность транспортировки и распределения

© Мухаметдинов А. М., Мударисов С. Г., 2025



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

семян и удобрений. Результаты исследования имеют практическое значение для совершенствования конструкций посевной техники и разработки цифровых двойников технологических процессов. На основе проведенного анализа предложены направления дальнейших исследований, включая разработку комплексных CFD-DEM моделей, учитывающих реальные условия работы пневмосистем. Работа вносит вклад в решение актуальной задачи повышения равномерности распределения посевного материала в современных почвообрабатывающих комплексах.

Ключевые слова: пневматическая система, посевной комплекс, параметры двухфазных течений, объемная концентрация удобрений, число Рейнольдса, коэффициент сопротивления

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

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и предложения, сделанные при рецензировании статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мухаметдинов А.М., Мударисов С.Г. Экспериментальная оценка параметров двухфазных течений в пневмосистеме посевного комплекса. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):243–265. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.243-265>

Experimental Estimation of Two-Phase Flow Parameters in the Pneumatic System of a Sowing Complex

A. M. Mukhametdinov[✉], S. G. Mudarisov

Bashkir State Agrarian University,
Ufa, Russian Federation

[✉] airat102@mail.ru

Abstract

Introduction. In modern sowing complexes, the process of transporting and distributing seeds and fertilizers is carried out using an air stream. When simulating the technological processes of these pneumatic systems using computational fluid dynamics and discrete elements, an important step is determining the parameters of the interphase interaction of two-phase air – seed and air – fertilizer flows. Both the possibility of implementing models with computational methods and the complexity of the models used depend on the intensity of interphase interaction.

Aim of the Study. The aim is to estimate experimentally the parameters of two-phase flows in the pneumatic system of a sowing complex, where an air stream is used as the carrier phase and a mixture of solid particles of fertilizer granules is used as the dispersed phase.

Materials and Methods. The study was conducted using experimental methods. There were used high-speed video shooting, a sail classifier and digital anemometers to analyze air flow and particle motion parameters. The study methodology included the determination of the moisture content of materials, the particle soaring velocity, the volume concentration of phases, and the calculation of hydrodynamic characteristics in various parts of the pneumatic system. Modern approaches to the analysis of two-phase flows were applied taking into account the interaction between the particles and walls of transport channels.

Results. The experiments have detected significant differences in flow parameters between horizontal and vertical sections of the pneumatic system. There have been identified the dependence of the aerodynamic characteristics of the particles on their physical-mechanical properties. There was a significant change in the volume concentration of the

dispersed phase along the length of the transport pneumatic pipeline of the sowing complex that indicates a transition between different flow modes. The particle drag coefficients showed a clear correlation with the similarity criteria characteristic of the interregion of the Rayleigh curve.

Discussion and Conclusion. The conducted studies allowed us to develop a methodology for estimating the parameters of two-phase flows in pneumatic systems and identify key factors affecting the efficiency of transporting and distributing seeds and fertilizers. The results of the study are of practical importance for improving the designs of sowing equipment and developing digital twins of technological processes. Based on the conducted analysis, there have been proposed the topics for further studies including the development of complex CFD-DEM models, which take into account the real operating conditions of pneumatic systems. The work contributes to solving the urgent problem of increasing the seed distribution uniformity in modern tillage complexes.

Keywords: pneumatic system, sowing complex, parameters of two-phase flows, volume concentration of fertilizers, Reynolds number, coefficient of resistance

Funding: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 23-76-10070 (<https://rscf.ru/project/23-76-10070/>).

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the reviewers for the valuable comments and suggestions made during the review of the article.

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

For citation: Mukhametdinov A.M., Mudarisov S.G. Experimental Evaluation of Two-Phase Flow Parameters in the Pneumatic System of a Sowing Complex. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):243–265. <https://doi.org/10.15507/2658-41.035.202502.243-265>

Введение. Современные почвообрабатывающие посевные комплексы с пневматическим транспортированием и распределением посевного материала не всегда удовлетворяют агротехническим требованиям, в частности, по равномерности распределения семян и удобрений по сошникам. Для повышения равномерности распределения посевного материала необходимо совершенствовать конструктивные схемы и параметры элементов пневматической системы посевных комплексов, что требует больших объемов экспериментальных исследований и проектных работ, сопряженных с затратами трудовых и материальных ресурсов. Ускорение этих процессов возможно при использовании цифровых двойников, проектируемых машин на базе моделей технологических процессов их работы. Технологический процесс пневматической системы посевного комплекса основан на перемещении твердых частиц (семян и удобрений) воздушным потоком, создаваемым вентилятором, для моделирования которого можно использовать методы гидродинамики, в частности, двухфазных течений и дискретных элементов [1]. Адекватность моделей двухфазных течений во многом зависит от корректного выбора уравнений динамики, аэродинамических свойств частиц, таких как критическая скорость и коэффициент сопротивления, а также моделей турбулентности, которые во многом определяются концентрацией дисперсной фазы (твердых частиц) в несущей фазе (воздушном потоке) и числом Рейнольдса частиц. Эти параметры можно определить только экспериментальным путем в изучаемом объекте, в нашем случае в пневматической системе посевного комплекса.

Таким образом, целью исследования является определение аэродинамических характеристик, таких как скорость витания, коэффициент сопротивления и число Рейнольдса в пневматической системе посевного комплекса, для улучшения равномерности распределения посевного материала.

Обзор литературы. С. Г. Мударисовым и др. [1] для реализации математических моделей технологического процесса работы пневматических систем зерновых сеялок методами механики двухфазных течений определены основные параметры для семян зерновых и бобовых культур: скорость воздушного потока для их транспортирования 17...24 м/с; объемная концентрация $\alpha_c = 0,0003...0,0015$; число Рейнольдса $Re_p = 980...4\ 800$; коэффициент сопротивления $C_d = 0,35...0,50$. На основе этих данных установлено, что малая объемная концентрация семян в пневмосистеме обеспечивает возможность применения методов механики двухфазных сред для математического описания технологического процесса посевного комплекса. Однако эти параметры определены до распределительной головки пневмостистемы и только для семян. Р. А. Júnior и др. [2] установили, что увеличение как влажности, так и плотности зерен влияет на их аэродинамические свойства, способствуя увеличению критической скорости и снижению коэффициента сопротивления. Определение скоростей проходило на экспериментальной установке с вертикальным расположением канала. Из приведенного анализа источников установлено, что для зерен сферической формы коэффициент лобового сопротивления составляет 0,44, при этом числа Рейнольдса находятся в диапазоне $Re_p = 1,0 \cdot 10^3...2,5 \cdot 10^5$.

В исследовании [3] критическая скорость и коэффициент сопротивления зерна пшеницы и солоmistых примесей после обмолота комбайном были экспериментально измерены учеными в потоке воздуха. Изучено влияние массы и влажности зерна пшеницы, положения и длины соломы на критическую скорость. Результаты показали, что масса и влажность оказывают значительное влияние на критическую скорость материала, а коэффициент сопротивления C_d зерен оказался равным 0,96, как у цилиндрической частицы.

Ученый F. Shahbazi [4] провел оценку аэродинамических свойств семян рапса и дикой горчицы в зависимости от содержания влаги от 5 до 20 %, в результате которой установлено, что конечная скорость семян рапса увеличивается по полиномиальной зависимости, а коэффициент сопротивления линейно уменьшается по мере увеличения содержания влаги от 5 до 20 %.

При моделировании распределения гранулированных материалов и семян необходимо учитывать разнообразие их свойств, а также их гигроскопичность [5–7]. В исследованиях ученых использовалось компьютерное моделирование и лабораторные испытания для анализа дальности разбрасывания и скорости движения семян различной влажности. В исследованиях применяется метод вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования перемещения частиц в пневматических системах посевных комплексов с представлением зависимости плотности и аэродинамических свойств при изменении влажности семян и удобрений [8–10]. В исследованиях установлено, что в зависимости от уровня влажности одно и то же минеральное удобрение может обладать разными свойствами, которые

существенно влияют технологический процесс работы, что необходимо учитывать при разработке моделей¹ [11].

Для использования метода вычислительной гидродинамики (CFD) необходимо определить такие аэродинамические свойства исследуемых сельскохозяйственных материалов, как скорость витания, коэффициент лобового сопротивления. Эти параметры использовались при определении зависимости коэффициента сопротивления гранул удобрений от числа Рейнольдса в сельскохозяйственных пневматических системах. Определение числа Рейнольдса с использованием методики замедленной видеосъемки представлено в статье [5]. При этом определялась скорость воздушного потока с помощью трубки Пито и микроманометра Testo 512. Скорость движения семян перед вертикальным распределителем определялась с помощью камеры CASIO Exilim-ZR200, работающей со скоростью от 480 до 1 000 кадров в секунду [12]. Было установлено влияние скорости воздушного потока и объемной концентрации семенного материала на равномерность распределения в вертикальном распределителе посевного комплекса в соответствии с агротехническими требованиями.

В. М. Дринча [13] представил результаты по определению скорости витания семян гороха различной фракции на парусном классификаторе К-293 «Петкус». Установлено, что частицы зерновой смеси с большим сопротивлением воздуху будут перемещаться медленнее тех, у кого сопротивление меньше. На величину аэродинамического сопротивления влияют такие факторы, как площадь поперечного сечения частицы, ее форма и положение в воздушном потоке, характер поверхности, скорость относительно воздуха, плотность воздуха и другие параметры.

В исследовании Т. Е. Grift и J. W. Hofstee [14] представлены результаты по определению аэродинамических свойств при падении с высоты под действием силы тяжести безвоздушного потока таких удобрений, как кальциево-аммиачная селитра, нитрат фосфорно-калийной селитры и калия с диаметром от 1,0 до 4,5 мм. По полученным теоретическим данным коэффициент сопротивления находится в диапазоне от 0,35 до 0,45.

В исследованиях [15; 16] предложена методика для обоснования конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик пневматических систем для перемещения различных типов сыпучих сельскохозяйственных материалов. Были определены физические характеристики (размер, вес, насыпная плотность, форма) и аэродинамические свойства (конечная скорость, коэффициент сопротивления) семян пшеницы для обоснования параметров семяочистительной машины. Приведены данные о зависимости числа Рейнольдса воздушного потока в различных режимах работы пневматических систем.

В исследовании [17] выполнен анализ коэффициента аэродинамического сопротивления семян пшеницы, ячменя, сои, гречихи, а также рассчитан поправочный

¹ Халиуллин Д. Т., Гарипов А. И. Исследование влияния влажности минеральных удобрений на аэродинамические свойства гранул // Современные достижения аграрной науки : научные труды Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф., посвящ. 80 летию д. с.-х. н., проф., член-корр. РАН, почетного члена АН РТ, академика АИ РТ, трижды Лауреата Государственных и Правительственной премии в области науки и техники, Заслуженного деятеля науки РФ, Заслуженного работника сельского хозяйства РТ Мазитова Назиба Каюмовича (2 ноября 2020 г., г. Казань). Казань : Казанский государственный аграрный университет, 2020. С. 174–183. <https://elibrary.ru/lsrcdqf>

коэффициент, который учитывает форму частиц зернового материала для определения коэффициента сопротивления. Установлено, что коэффициенты сопротивления воздушному потоку для семян основных зерновых культур коррелируют с критерием Рейнольдса и варьируются в пределах от 0,45 до 1,00 в зависимости от режимов течения воздушной смеси. В то же время коэффициенты сопротивления для семян рапса, сои и проса близки к значению 0,44, тогда как для семян пшеницы, ржи, ячменя и кукурузы они приближены к 1,00.

Обзор научных исследований показывает, что исследования аэродинамических параметров выполнены в основном для семян сельскохозяйственных культур, а в посевных комплексах кроме семян производится пневмотранспортирование гранулированных удобрений. Для создания цифрового двойника технологического процесса посевных комплексов необходимо провести экспериментальную оценку параметров двухфазных течений в пневмосистеме не только для семян, но и для гранулированных удобрений.

Материалы и методы. В двухфазных течениях одной фазой является воздух, а второй – твердые частицы, например, в случае с посевным комплексом семена и гранулы удобрений. Различие в физико-механических свойствах фаз определяет неравномерный характер движения воздуха и частиц. Инерционность частиц приводит к их отставанию от воздуха и разделению траекторий движения.

Методика экспериментального определения этих параметров производилась нами в следующей последовательности: 1) определение влажности удобрений, скорости витания, скорости движения удобрений на парусном классификаторе «Петкус»; 2) определение интенсивности межфазного взаимодействия (объемной концентрации удобрений) и определение режима двухфазного течения (определение числа Рейнольдса, коэффициента сопротивления) в различных зонах пневмосистемы посевного комплекса. При этом в зоне I перед распределителем в горизонтальном участке пневмопровода скорость частиц гранул удобрений не удалось измерить с помощью замедленной съемки в виду высокой скорости их перемещения. Частицы гранул удобрений размываются на кадре, так как замедленная съемка с частотой 240 кадров в секунду не обеспечивает их четкую фиксацию. Скорость движения гранул удобрений, числа Рейнольдса в зоне I определены теоретически по формулам.

Определение влажности удобрений, скорости витания, скорости движения удобрений на парусном классификаторе «Петкус». Для исследований были приняты пять образцов удобрений, находящие наибольшее применение в растениеводстве²: нитроаммофоска с содержанием N – 16 %, P – 16 %, K – 16 %; азофоска (нитроаммофоска) с содержанием N – 16 %, P – 16 %, K – 16 %; карбамид (мочевина) с содержанием N – 46,2 %; карбамид с содержанием азота N – 46,2 %; диаммонийфосфат с содержанием P – 47 %, N – 18 % [18].

² Обухов В. В., Мухаметдинов А. М., Ямалетдинов М. М. Обзор применяемых гранулированных минеральных удобрений в Республике Башкортостан // Проблемы и перспективы развития инженерной науки в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию работы кафедры эксплуатации и ремонта машин инженерного факультета и 90-летию д-ра техн. наук, проф., почетного работника высш. проф. образов. РФ Зорина Александра Ивановича (13 – 15 февраля 2024 г., г. Ижевск). Ижевск : Удмуртский государственный аграрный университет, 2024. С. 121–126. <https://elibrary.ru/mecwkc>

Для определения влаги в отобранных образцах удобрений была применена методика испытаний по ГОСТ 20851.4-75 «Удобрения минеральные. Методы определения воды»³. Испытания проводились в лаборатории биохимического анализа и биотехнологии Башкирского государственного аграрного университета. Для этого использовался метод определения гигроскопической и общей воды высушиванием в сушильном шкафу. Условия проведения испытаний: масса пробы – 5 г; температура сушки – 65 °С; количество образцов удобрений – 5 шт. Для измерения массы пробы использовались аналитические электронные весы HR-120 (рис. 1а).

Отбирались две пробы в бюксы каждого образца удобрения и помещались в конвекционный сушильный шкаф (рис. 1б) для первого анализа. Для второго анализа разработана методика для определения влажности более плотных по структуре минеральных удобрений (нитроаммофоска, диаммонийфосфат, азофоска). Представлены образцы удобрений до размола (рис. 1с) и после размола (рис. 1д).



Р и с. 1. Определение влажности гранулированных минеральных удобрений:

а) измерение массы пробы на аналитических электронных весах HR-120;

б) высушивание образцов в конвекционном сушильном шкафу;

с) образцы удобрений до размола; д) образцы удобрений после размола

Fig. 1. Determination of moisture content of granular mineral fertilizers:

a) measurement of sample weight on analytical electronic scales HR-120;

b) drying of samples in a convection drying cabinet; c) samples of fertilizers without grinding;

d) samples of fertilizers after grinding

Источник: фотографии сделаны А. М. Мухаметдиновым при проведении экспериментальных исследований в лаборатории биохимического анализа и биотехнологии Башкирского государственного аграрного университета в 2024 г.

Source: the photos were taken by A. M. Mukhametdinov during experimental research in the Laboratory of Biochemical Analysis and Biotechnology of the Bashkir State Agrarian University in 2024.

³ ГОСТ 20851.4-75. Удобрения минеральные. Методы определения воды [Электронный ресурс]. URL: <https://megainorm.ru/Data2/1/4294832/4294832705.pdf> (дата обращения: 23.09.2024).

Разработанная методика включает необходимость после отбора проб производить размол более плотных гранул удобрений на мельнице или в ступке с пестиком. Таким образом достигается размалывание и перетирание образцов удобрений, что благоприятно влияет на процесс извлечения влаги из образцов в конвекционном сушильном шкафу.

Образцы взвешивались до и после сушки. После этого производили подсчет массовой доли влаги по формуле:

$$X = \frac{(m - m_1)100}{m_2},$$

где m – масса бюксы с пробой до высушивания, г; m_1 – масса бюксы с пробой после высушивания, г; m_2 – масса навески, г. При обработке результатов анализа принимали среднее арифметическое двукратной (для карбамида – трехкратной) повторности, допускаемые расхождения между которыми при доверительной вероятности $P = 0,95$ не должны превышать следующих значений: 0,05 % (при массовой доле влаги до 0,5 %); 0,2 % (при массовой доле влаги свыше 0,5–2,0 %); 0,4 % (при массовой доле влаги свыше 2,0–6,0 %).

Результаты испытаний подтверждаются протоколом анализа № 7 от 22.11.2024 г., выданным лабораторией биохимического анализа и биотехнологии Башкирского государственного аграрного университета, и представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Результаты анализа по определению влаги в удобрениях
Results of analyzing the moisture determination in fertilizers

Наименование и состав удобрений / Name and composition of fertilizers	Содержание влаги, % / Moisture content, %	
	1 анализ без размола образцов / 1 analysis without grinding of samples	2 анализ с размолотом образцов / 2 sample grinding analysis
Нитроаммофоска / Nitroammophoska	0,37	0,5
Азофоска (нитроаммофоска) / Azofoska (nitroammofoska)	0,24	0,4
Карбамид (мочевина) / Carbamide (urea)	0,10	0,1
Карбамид / Carbamide	0,04	0,2
Диаммонийфосфат / Diammonium Phosphate	0,18	1,7

Методика для определения влажности более плотных по структуре минеральных удобрений (нитроаммофоска, диаммонийфосфат, азофоска) включает необходимость после отбора проб производить размол частиц гранул на мельнице или в ступке с пестиком более плотных гранул удобрений. Таким образом достигается размалывание и перетирание образцов удобрений, что благоприятно влияет на процесс извлечения влаги из образцов в конвекционном сушильном шкафу.

Были проведены два анализа извлечения влаги из удобрений. В первом анализе образцы удобрений после отбора проб помещались в конвекционный сушильный шкаф. Установлено, что таким образом не достигается полное извлечение влаги из-за плотной структуры образцов. Во втором анализе производили размалывание

и перетирание образцов удобрений. Установлено, что это благоприятно влияет на процесс извлечения влаги в конвекционном сушильном шкафу из более плотных гранул удобрений.

Скорость витания удобрений определялась экспериментально на парусном классификаторе «Петкус» (рис. 2а). Для определения скорости витания частиц удобрений и необходимого воздушного потока разработаны лабораторная установка и специальная методика.

Навеску с образцом гранулированных минеральных удобрений весом 100 г поместили в загрузочную воронку. Скорость воздушного потока в аэродинамической трубе регулировалась с помощью заслонки ротаметра. Гранулы удобрений, скорость витания которых была ниже заданной скорости воздуха в трубе, поднимались вверх и попадали в сборник осадочной камеры. Затем удобрения извлекли из сборника и взвешивали. После этого их снова засыпали в воронку для повторного испытания. Измерения воздушного потока на входе без подачи удобрений представлены на рисунке 2б.



а)



б)

Р и с. 2. Парусный классификатор «Петкус»:

- а) измерение воздушного потока с подачей удобрений;
- б) измерение воздушного потока на входе без подачи удобрений

F i g. 2. Petkus sailing classifier:

- а) measurement of air flow with fertilizer supply;
- б) measuring the air flow at the inlet without applying fertilizers

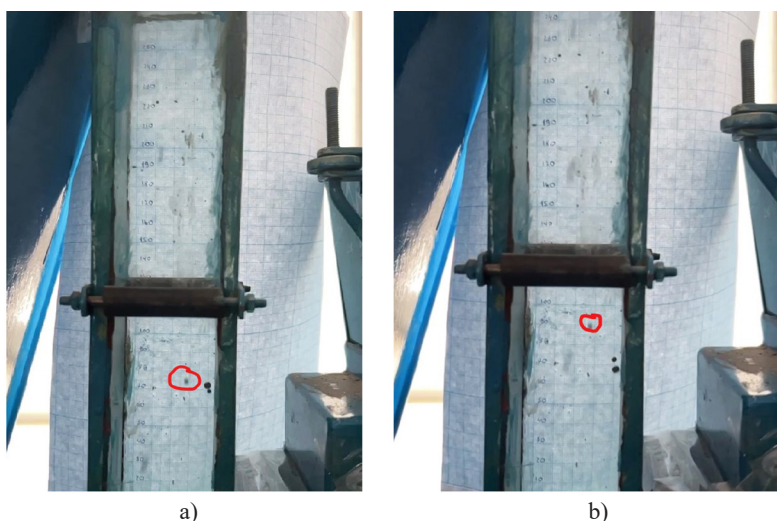
Источник: фотографии для рисунков 2, 3, 6, 7 сделаны А. М. Мухаметдиновым при проведении экспериментальных исследований на кафедре мехатронных систем и машин аграрного производства Башкирского государственного аграрного университета в 2024 г.

Source: the photos for the figures 2, 3, 6, 7 were taken by A. M. Mukhametdinov during experimental research at the Department of Mechatronic Systems and machines of agricultural Production of the Bashkir State Agrarian University in 2024.

Динамическое давление $P_{\text{дин}}$ в аэродинамической трубе измеряли микроманометром с трубкой Пито-Прандтля. По динамическому давлению вычисляли скорость воздушного потока.

Скорость движения удобрений в вертикальной трубке определялась по изображениям, полученным в ходе замедленной видеосъемки смартфоном Apple iPhone 15 Pro Max. Для расчета скорости определялись расстояния, которые проходят гранулы удобрений (мм), и время их перемещения (мс). Реальное расстояние, пройденное гранулой удобрения, устанавливалось с использованием миллиметровой бумаги.

На рисунке 3 показано, как ведется замедленная видеосъемка процесса полета частиц гранул удобрений.



а)

б)

Р и с. 3. Определение скорости витания:

а) первая точка измерения; б) вторая точка измерения

F i g. 3. Determination of the soaring speed:

а) the first measurement point; б) the second measuring point

Результаты по определению скорости витания пяти наименований гранулированных удобрений представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Аэродинамические характеристики гранул удобрений в вертикальном канале парусного классификатора «Петкус»

Aerodynamic characteristics of fertilizer granules in the vertical channel of the sailing classifier “Petkus”

Наименование удобрений / Name of fertilizers	Скорость воздушного потока v_g , м/с / Air flow velocity v_g , m/s	Скорость витания $v_{\text{вит}}$, м/с / Soaring speed $v_{\text{вит}}$, m/s	Скорость дви- жения удобре- ний v_p , м/с / The speed of movement of fertilizers v_p , m/s	Число Рейнольдса Re_p для удобрений / Reynolds Number Re_p for Fertilizers	Коэффициент сопротивления удобрений C_d / Coefficient of fertilizer resistance C_d
1	2	3	4	5	6
Нитроаммофоска / Nitroammophoska	14	8,3	2,41	2 730	0,448790
Карбамид / Carbamide	14	6,5	2,93	2 607	0,449203

Окончание табл. 2 / End of table 2

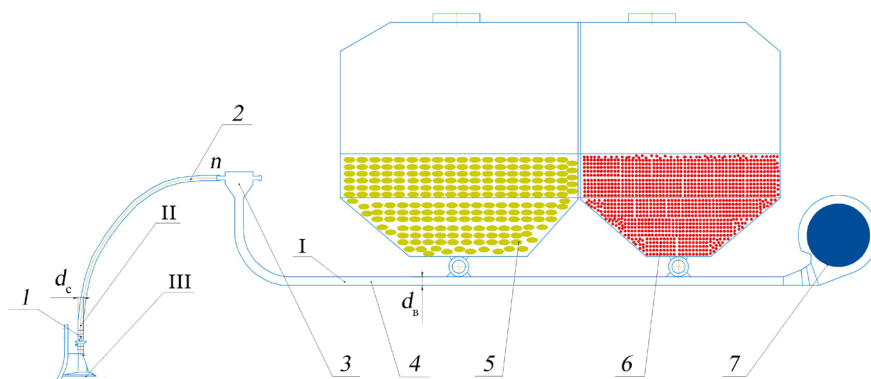
1	2	3	4	5	6
Диаммонийфосфат / Diammonium Phosphate	14	8,9	2,25	2 768	0,448670
Азофоска (нитроаммофоска) / Azofoska (nitroammofoska)	14	7,4	2,48	2 713	0,448843
Карбамид (мочевина) / Carbamide (urea)	14	6,6	2,91	2 612	0,449186

Определение интенсивности межфазного взаимодействия (объемной концентрации удобрений) и определение режима двухфазного течения (определение числа Рейнольдса, коэффициента сопротивления) в различных зонах пневмосистемы посевного комплекса. Для определения этих характеристик разработана лабораторная установка на основе бункера и распределительной системы посевного комплекса Джон-Дир 1910. Для измерения скорости воздушного потока использовался цифровой анемометр РМ6252В. Он используется для измерения температуры окружающей среды, объема воздуха и скорости воздушного потока с диапазоном от 0,9 до 30,0 м/с. Для измерения динамического давления воздушной смеси и гранул удобрений использовалась трубка Пито-Прандтля. По динамическому давлению производили расчет скорости воздушного потока. Для измерения скорости движения удобрений использовалась методика замедленной фото- и видеофиксации перемещения частиц на разработанной лабораторной установке. По фотографии производили расчет пройденного расстояния одной частицы гранулы путем измерения его перемещения на миллиметровой бумаге.

Ввиду того, что высеваящий аппарат и вентилятор посевного комплекса Джон-Дир 1910 имеют привода от гидромоторов, для создания напора масла использовался гидронасос НШ-50 с электроприводом на 17 кВт.

Лабораторная установка (рис. 4) на базе посевного комплекса Джон-Дир 1910 состоит из вентилятора 7, бункера для удобрений 6, бункера для семян 5, пневмопровода 4, вертикального распределителя 3, семя-тукопровода 2, сошника 1. Измерение скорости воздушного потока производилось в трех зонах: перед распределителем в горизонтальном участке пневмопровода (зона I), после распределителя в вертикальном участке семя-тукопровода (зона II) и на выходе из сошника (зона III). На рисунке 4 представлена схема расположения зон измерения скорости воздушного потока и удобрений в посевном комплексе.

Для измерения скорости воздушного потока в горизонтальном участке пневмопровода (зона I) перед распределителем (рис. 5а) использовался цифровой анемометр РМ6252В (рис. 5б).



Р и с. 4. Схема для измерения скорости воздушного потока и скорости гранул удобрений:

1 – сошник; 2 – семя-тукопровод; 3 – вертикальный распределитель; 4 – пневмопровод; 5 – бункер для семян; 6 – бункер для удобрений; 7 – вентилятор

Fig. 4. A diagram for measuring the air flow velocity and the speed of fertilizer granules:

1 – coulter; 2 – seed line; 3 – vertical distributor; 4 – pneumatic line; 5 – seed hopper; 6 – fertilizer hopper; 7 – fan

Примечание: I, II, III – зоны измерения скорости воздушного потока и скорости гранул удобрений.
Note: I, II, III – zones for measuring the air flow velocity and the speed of fertilizer granules.

Источник: составлено авторами статьи.

Source: compiled by the authors of the article.



a)



b)

Р и с. 5. Измерение скорости воздушного потока:

a) горизонтальный участок пневмопровода (зона I), где происходило измерение перед распределителем; b) цифровой анемометр PM6252B

Fig. 5. Air flow velocity measurement:

a) horizontal section of the pneumatic line (zone I), where the measurement took place in front of the distributor; b) digital anemometer PM6252B

Источник: a) фотография сделана А. М. Мухаметдиновым на кафедре мехатронных систем и машин аграрного производства Башкирского государственного аграрного университета во время экспериментальных исследований в 2024 г.; b) изображение взято из https://www.ozon.ru/product/tsifrovoy-anemometr-1575292834/?oos_search=false.

Source: a) the photo was taken by A. M. Mukhametdinov at the Department of Mechatronic Systems and Machines of Agricultural Production of the Bashkir State Agrarian University during experimental research in 2024; b) the image was taken from https://www.ozon.ru/product/tsifrovoy-anemometr-1575292834/?oos_search=false.

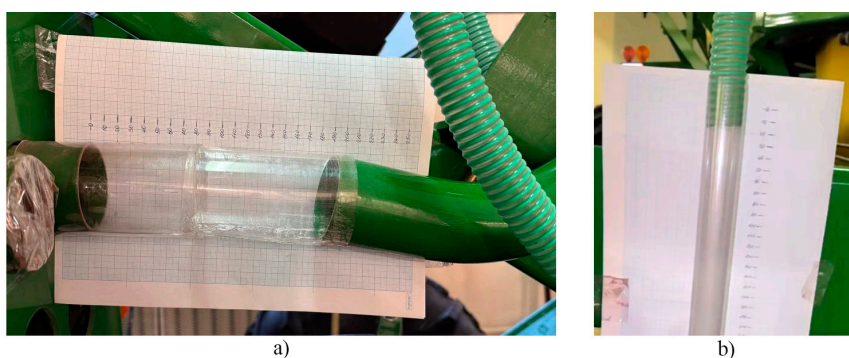
На рисунке 6 представлено измерение скорости воздушного потока и удобрений в зонах II и III с помощью трубки Пито-Прандтля.



Р и с. 6. Измерение скорости воздушного потока и удобрений в зонах II и III:
1 – сошник; 2 – миллиметровая бумага; 3 – емкость с удобрениями; 4 – трубка Пито-Прандтля;
5 – камера для замедленной фото- и видеофиксации

F i g. 6. Measurement of air flow velocity and fertilizers in zones II and III:
1 – coulter; 2 – millimeter paper; 3 – container with fertilizers; 4 – Pitot-Prandtl tube; 5 – camera
for slow-motion photo and video recording

Для измерения скоростей гранул в зонах I и II из мягкой прозрачной пленки ПВХ изготовлены вставки в семя-тукопроводе (рис. 7).



Р и с. 7. Экспериментальные прозрачные вставки в семя-тукопроводе:
a) прозрачная вставка горизонтального участка перед распределителем в зоне I;
b) прозрачная вставка вертикального участка семя-тукопровода в зоне II

F i g. 7. Experimental transparent seed inserts (tuco)wires:
a) transparent insertion of the horizontal section in front of the distributor in zone I;
b) transparent insertion of the vertical section of the seed(tuco)wires in zone II

Для определения режима течения смеси «газ – частицы» (воздух – гранула удобрений) в пневмосистеме посевного комплекса необходимо установить числа Рейнольдса частиц (удобрений) Re_p и объемную концентрацию удобрений α_c . Для определения этих параметров нужно, в свою очередь, знать количество транспортируемого материала, скорость движения воздушного потока и удобрений, а также коэффициент их аэродинамического сопротивления.

Сила аэродинамического сопротивления определяется по формуле:

$$F_f = \frac{1}{2} C_d \rho_g S_m |v_g - v_p| (v_g - v_p),$$

где C_d – коэффициент сопротивления; ρ_g – плотность воздушного потока, кг/м³; S_m – площадь миделева сечения частицы удобрения, м²; v_g – скорость воздушного потока, м/с; v_p – скорость частицы удобрений, м/с.

Число Рейнольдса для частиц (удобрений) определяется по формуле⁴:

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g |v_g - v_p|}{\eta}, \quad (1)$$

где ρ_g – плотность воздушного потока, кг/м³ (1,225 кг/м³ при 20 °); η – динамическая вязкость воздуха, Па·с ($\eta = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Па·с при 20 °С).

Коэффициент сопротивления частицы C_d в окружении других частиц гранул удобрений отличается от значения C_{d0} , полученного для единичной частицы гранулы удобрений в неограниченном потоке, так как в стесненных условиях взаимодействие частиц гранул удобрений друг с другом и со стенками ограничивает течение. В этом случае

$$C_d = \Psi(\alpha_c) C_{d0}, \quad (2)$$

где $\Psi(\alpha_c)$ – поправочный множитель; α_c – объемная концентрация.

Поправочный множитель в формуле (2) учитывает гидродинамическое взаимодействие между частицами гранул удобрений ($\Psi(\alpha_c) \rightarrow 1$ при $\alpha_c \rightarrow 0$), которое возникает за счет локального искажения поля течения воздушного потока в окрестности частицы гранулы, близкорасположенной к другим частицам гранул удобрения.

Объемная концентрация удобрений α_c определяет характер межфазного взаимодействия. Когда концентрация примесей мала ($\alpha_c < 10^{-6}$), воздействие частиц гранул удобрений на воздушный поток незначительно, и ими можно пренебречь в расчетах. При этом данный диапазон относится к слабозапыленным течениям. В диапазоне $10^{-6} < \alpha_c \leq 10^{-3}$ дисперсная фаза оказывает обратное воздействие на несущую фазу и также относится к слабозапыленным течениям. С увеличением объемной концентрации $\alpha_c > 10^{-3}$ необходимо учитывать обратное влияние частиц гранул удобрений друг на друга, а также их взаимодействие с воздушным потоком несущей фазы (режим взаимного влияния фаз). Данный диапазон относится к сильнозапыленным течениям.

⁴ Волков К. Н., Емельянов В. Н. Течения газа с частицами. М. : Физматлит, 2008. 600 с.

Объемная концентрация частиц α_c в пневматической системе посевного комплекса определяется как отношение объема частиц удобрений к объемному расходу поступающего воздуха за единицу времени:

$$\alpha_c = \frac{W_p}{W_g},$$

где W_p – объем гранул удобрений в элементарном объеме воздуха за единицу времени, м³/с; W_g – элементарный объемный расход воздуха, поступающий в рассматриваемую область за единицу времени, м³/с.

Объем гранул удобрений W_p в посевном комплексе можно определить по расходу удобрений за единицу времени исходя из нормы их внесения Q :

$$W_p = \frac{B_p v_{\text{пк}} Q}{10\,000 \cdot \rho_3}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где B_p – ширина захвата посевного комплекса, м; $v_{\text{пк}}$ – рабочая скорость посевного комплекса, м/с; Q – норма внесения удобрений, кг/га; ρ_3 – плотность удобрений, кг/м³.

Объем удобрений в семя-тукопроводах сошников W_{pc} определяется как объем гранул удобрений W_p в элементарном объемном расходе воздуха за единицу времени к количеству сошников при одноступенчатой системе распределения (рис. 6), которая используется в рассматриваемом посевном комплексе, определяется по формуле:

$$W_{\text{pc}} = \frac{W_p}{n_c},$$

где n_c – количество сошников.

Для расчета объема воздуха W_g в семя-тукопроводах пневматической системы посевного комплекса воспользуемся уравнением неразрывности или постоянства расходов воздуха соответственно для любого сечения трубы. Площадь сечения труб после распределителя удобрений будет равна сумме площадей сечения труб, расходящихся от данного распределителя:

$$W_g = v_{gB} S_{gB},$$

где v_{gB} – скорость воздушного потока перед распределителем, м/с; S_{gB} – площадь поперечного сечения пневмопровода перед распределителем, которая определяется по диаметру пневмопровода, м².

$$S_{gB} = \frac{\pi}{4} d_B^2,$$

где d_B – диаметр пневмопровода перед распределителем, м.

Площадь сечения семя-тукопровода:

$$S_{gc} = \frac{\pi}{4} d_c^2,$$

где d_c – диаметр семя-тукопровода, м.

Рассматривая одноступенчатую систему распределения удобрений и предполагая для примера, что все распределители разделяют поток на n сошников, можем написать:

$$v_{gB} d_B^2 = v_{gc} d_c^2 n, \quad (3)$$

где v_{gB} – скорость воздушного потока в пневмопроводе перед распределителем, м/с; v_{gc} – скорость воздушного потока после распределителя в вертикальном участке семя-тукопровода перед сошником, м/с; n – количество выходов на распределителе.

По выражению (3) можно определить изменения скорости воздушного потока на месте перехода от вентилятора к семя-тукопроводу и при прохождении через распределитель:

$$\frac{v_{gB}}{v_{gc}} = \frac{d_c^2 n}{d_B^2}.$$

Для работы пневматической системы сеялки без забивания скорость воздушного потока в вертикальных трубах должна быть больше скорости витания удобрений:

$$v_g = k_3 (10,5 + 0,57 v_{\text{вит}}),$$

где v_g – скорость воздушного потока в вертикальных трубах, м/с; $v_{\text{вит}}$ – средняя скорость витания гранул удобрений, м/с; $k_3 = 1,2 \dots 1,5$ – коэффициент запаса.

Тогда выражение для определения относительной скорости частиц можно представить в следующем виде:

$$v_p = (0,73 \div 0,98)(v_g - v_{\text{вит}}).$$

Потребную скорость воздушного потока рассчитывали с коэффициентом запаса k_3 , равным 1,35.

Результаты исследования. *Результаты по определению влажности удобрений, скорости витания, скорости движения удобрений на парусном классификаторе «Петкус».* Установлено, что из-за плотной структуры и защитной оболочки не удастся максимально выделить влагу из таких образцов удобрений, как нитроаммофоска, диаммонийфосфат, азофоска. После первого тестирования без размола влажность для нитроаммофоски составила 0,37 %; для карбамида с микроэлементами – 0,2 %; диаммонийфосфата – 1,7 %; азофоски – 0,4 %; карбамида (мочевина) – 0,1 % (табл. 1).

После размола во втором анализе содержание влаги в нитроаммофоске составило 0,5 %; карбамиде с микроэлементами – 0,2 %; диаммонийфосфате – 1,7 %; азофоске – 0,4 %; карбамиде (мочевине) – 0,1 %. Образец удобрения карбамид (мочевина) не требует размола, так как получены одинаковые результаты в обоих анализах.

Установлено, что образцы карбамида (мочевина) и карбамида с микроэлементами более гигроскопичны, при хранении могут образовываться комочки. Эти образцы рекомендуется использовать для поверхностного внесения или подкормки

в период роста и развития растений. Образцы удобрений нитроаммофоска, карбамид с микроэлементами, диаммонийфосфат, азофоска имеют более плотную структуру, защитную оболочку и остаются рассыпчатыми, что характеризует их высокую прочность и облегчает их перемещение в пневматических системах. Нормативными документами утверждено, что при соблюдении условий хранения и транспортирования влажность не изменяется, производителями дается три года на гарантийный срок хранения для розничной продажи и неограниченный срок годности.

В таблице 2 представлены результаты экспериментов по определению скорости воздушного потока v_g , скорости витания $v_{\text{внт}}$ и скорости движения удобрений v_p , а также число Рейнольдса Re_p согласно формуле (1) и коэффициент сопротивления удобрений C_d по формуле (2), рассчитанные по данным полученным на парусном классификаторе «Петкус».

Зависимость коэффициента сопротивления гранул C_d рассчитывается в зависимости от чисел Рейнольдса Re_p , исходя от диапазона их изменений. Так, при $Re_p < 1$ коэффициент сопротивления C_d определяется по зависимости Стокса, при $10^3 < Re_p < 10^5$ – по зависимости Ньютона, а для диапазона $1 < Re_p \leq 10^3$ отсутствуют четко установленные зависимости.

Числа Рейнольдса Re_p для удобрений по данным экспериментов варьируются в пределах от 2 607 до 2 768, что относится к промежуточной области $1 < Re_p \leq 10^3$. В данном интервале чисел Рейнольдса коэффициент сопротивления частиц C_d описывается различными эмпирическими зависимостями. Нами для расчета, согласно исследованию [1], принята зависимость, полученная Р. В. James⁵:

$$C_d = \frac{24}{Re_p} + 0,44.$$

Коэффициент сопротивления для исследуемых типов удобрений C_d в вертикальном воздушном потоке варьируются в пределах от 0,448670 до 0,449203. Эти параметры нужны при моделировании технологического процесса распределения и транспортирования удобрений пневматической системой посевного комплекса методами вычислительной гидродинамики, в частности, методами двухфазных течений.

Результаты по определению интенсивности межфазного взаимодействия (объемной концентрации удобрений) и режима двухфазного течения (число Рейнольдса, коэффициента сопротивления) в различных зонах пневмосистемы посевного комплекса. В таблице 3 представлены аэродинамические характеристики гранул различных минеральных удобрений и показатели воздушного потока в горизонтальном участке пневмопровода (зона I) посевного комплекса по результатам расчетов по формулам.

⁵ James P. W., Hewitt G. F., Whalley P. B. Droplet Motion in Two-Phase Flow // ANS/ASME Topical Meeting on Reactor Thermal-Hydraulics (9 – 12 October 1980, NY, USA). P. 1484–1503. <https://inis.iaea.org/records/nrdn5-yfc03>

Т а б л и ц а 3

Table 3

**Аэродинамические характеристики гранул удобрений в пневматической системе
посевого комплекса**

Aerodynamic characteristics of fertilizer granules in the pneumatic system of the sowing complex

Наименование удобрений / Name of fertilizers	Скорость воздушного потока v_g , м/с / Air flow velocity v_g , m/s	Скорость движения удобрений v_p , м/с / The speed of movement of fertilizers v_p , m/s	Число Рейнольдса Re_p для удобрений / Reynolds Number Re_p for Fertilizers	Коэффициент сопротивления удобрений C_d / Coefficient of fertilizer resistance C_d
Нитроаммофоска / Nitroammophoska	20,50	12,1	2 337	0,450270
Карбамид / Carbamide	19,20	12,4	1 996	0,452024
Диаммонийфосфат / Diammonium Phosphate	21,10	11,9	2 469	0,449719
Азофоска (нитроаммофоска) / Azofoska (nitroammofoska)	19,90	12,2	2 170	0,451059
Карбамид (мочевина) / Carbamide (urea)	19,24	12,4	2 019	0,451888

Согласно полученным данным в горизонтальном участке пневмопровода (зона I) посевого комплекса скорости движения воздушного потока для обеспечения транспортировки гранул различных минеральных удобрений составляют $v_g = 19,2 \dots 21,1$ м/с. При этом число Рейнольдса гранул варьируется в пределах от 996 до 2 469, что соответствует промежуточной зоне кривой Рэлея (область II). В связи с этим для расчета коэффициент сопротивления удобрений C_d также использована зависимость Р. В. Джеймса⁶. Коэффициент сопротивления удобрений C_d в зоне изменяется в пределах от 0,449719 до 0,452024.

В таблице 4 представлены экспериментальные данные по определению параметров двухфазных течений в различных зонах пневматической системы посевого комплекса.

В результате экспериментальных данных установлено, что в вертикальном участке семя-тукопровода (зона II) посевого комплекса скорость движения воздушного потока v_g составляет 7,5...9,8 м/с, скорость гранул минеральных удобрений – 3,4...4,2 м/с. При этом число Рейнольдса $Re_p = 966 \dots 1\,319$, а коэффициент сопротивления удобрений $C_d = 0,458192 \dots 0,464848$.

На выходе из сошника (зона III) скорость воздушного потока v_g составляет 3,5...5,0 м/с, скорость гранул минеральных удобрений – 2,1...2,9 м/с, число Рейнольдса $Re_p = 330 \dots 495$, а коэффициент сопротивления удобрений $C_d = 0,496599 \dots 0,512777$.

⁶ James P. W., Hewitt G. F., Whalley P. B. Droplet Motion in Two-Phase Flow // ANS/ASME Topical Meeting on Reactor Thermal-Hydraulics.

Аэродинамические показатели для удобрений в зонах II и III выше данных, полученных теоретическим путем для горизонтального участка пневмопровода. Это связано с уменьшением диаметра семя-тукопроводов, усиливающим концентрацию и геометрическую стесненность потока удобрений.

Таблица 4

Table 4

**Экспериментальные данные по определению параметров двухфазных течений
в пневматической системе посевного комплекса**

**Experimental data on determining the parameters of two-phase flows in the pneumatic system
of a sowing complex**

№ зоны / Zone number	Скорость воздушного потока v_g , м/с / Air flow velocity v_g , m/s	Скорость движения удобрений v_p , м/с / The speed of movement of fertilizers v_p , m/s	Объемная концен- трация α_c / Volume concentration α_c	Число Рейнольдса Re_p для удобрений / Reynolds Number Re_p for Fertilizers	Коэффициент сопротивления удобрений C_d / Coefficient of fertilizer resistance C_d
I	25,8...26,1	Не определялась / Undefined	0,002...0,008	Не определя- лась / Undefined	Не определялась / Undefined
II	7,5...9,8	3,4...4,2	0,00022...0,000088	966...1 319	0,458192... 0,464848
III	3,5...5,0	2,1...2,9		330...495	0,496599... 0,512777

Обсуждение и заключение. Высокая влажность удобрений приводит к увеличению их массы и уменьшению подвижности. Соответственно, это требует увеличения скорости воздушного потока в пневматических системах посевных комплексов для поддержания необходимого уровня перемещения и распределения. С увеличением влажности минеральных гранулированных удобрений растут и скорости витания (кроме карбамида мочевины с более низкой плотностью 760 кг/м³).

По экспериментальным данным, полученным на парусном классификаторе «Петкус», при скорости воздушного потока 14 м/с скорость движения удобрений составляет 2,25...2,93 м/с; число Рейнольдса гранул удобрений $Re_p = 2\ 607...2\ 768$ (при $1 < Re_p \leq 10^3$), что соответствует промежуточной зоне кривой Рэлея (область II). При этом коэффициент сопротивления гранул удобрений $C_d = 0,448670...0,449186$.

В результате экспериментальных исследований установлено, что скорость воздушного потока в горизонтальном участке пневмопровода зоны I посевного комплекса составляет в среднем 25,8...26,1 м/с, а при необходимой скорости для транспортирования удобрений 19...21 м/с. Соответственно, скорость воздушного потока создается с запасом. Полученные результаты скоростей воздушного потока находятся в том же диапазоне значений, полученных в исследованиях по определению скорости воздушного потока перед вертикальным распределителем в пневмосистеме сеялки [12; 19].

В вертикальном участке семя-тукопровода в зоне II после распределителя скорость воздушного потока составляет 7,5...9,8 м/с. Такая скорость воздуха

достаточна для перемещения удобрений, так как семя-тукопроводы имеют отрицательный уклон. Скорость частиц гранул удобрений достигает $3,4 \dots 4,2$ м/с. Число Рейнольдса Re_p в зоне II для удобрений составляет $966 \dots 1\,319$, что соответствуют промежуточной зоне кривой Рэлея (область II, $1 < Re_p \leq 10^3$).

В зоне III на выходе из сошника скорость воздушного потока составляет $3,5 \dots 5,0$ м/с, скорость движения удобрений – $2,1 \dots 2,9$ м/с, числа Рейнольдса $Re = 330 \dots 495$, что также соответствуют промежуточной зоне кривой Рэлея (область II). В этом диапазоне аэродинамический коэффициент сопротивления гранулированных удобрений сильно зависит от числа Рейнольдса. По экспериментальным данным в пневмосистеме посевного комплекса наблюдается снижение коэффициента сопротивления $C_d = 0,512777 \dots 0,458192$ с ростом числа Рейнольдса $Re_p = 330 \dots 1\,319$, что соответствует кривой Рэлея.

Объемная концентрация α_c удобрений в пневматической системе посевного комплекса в горизонтальной зоне I пневмопровода варьируется в пределах от $0,002$ до $0,008$, что согласно общепринятой классификации двухфазных гетерогенных потоков соответствует высокой концентрации частиц (режим взаимовлияния фаз), так как $\alpha_c \geq 10^{-3}$ и относится к сильнозапыленным течениям. В этом случае при моделировании технологических процессов посевных комплексов методами вычислительной гидродинамики необходимо учитывать обратное воздействие частиц друг на друга, а также их взаимодействие между собой (режим взаимовлияния фаз). Кроме этого из-за концентрационной стесненности потока необходимо учитывать взаимодействие частиц гранул удобрений друг с другом и со стенками семя-тукопровода. При этом в данной зоне скорость частиц гранул удобрений не удалось измерить в виду высокой скорости их перемещения. Замедленная съемка 240 кадров в секунду не позволяет произвести фиксацию в виду того, что частицы расплываются в кадре. Необходимо использовать камеру для видеосъемки с частотой не менее $1\,000$ кадров в секунду.

Объемная концентрация частиц удобрений в вертикальном участке семя-тукопровода в зоне II после распределителя в семя-тукопроводе уменьшается и составляет $\alpha_c = 0,00022 \dots 0,000088$ и входит в диапазон $10^{-6} < \alpha_c \leq 10^{-3}$ слабозапыленного течения. В этом случае взаимодействие между частицами удобрений снижается, дисперсная фаза (гранулы) оказывает обратное воздействие на несущую фазу, что также необходимо учитывать при моделировании.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что в пневматической системе посевного комплекса интенсивность межфазного взаимодействия частиц гранул удобрений отличается в различных зонах – объемная концентрация меняется от сильнозапыленного до слабозапыленного течения, числа Рейнольдса лежат в промежуточной области по кривой Рэлея. Данные отличия необходимо учитывать при моделировании пневматических систем посевных комплексов методами вычислительной гидродинамики, а также при сопряжении данного метода с методом дискретных элементов (CFD-DEM).

В дальнейших исследованиях пневматических систем посевных комплексов планируется использование технологии сопряженного моделирования вычислительной гидродинамики и метода дискретных элементов (CFD-DEM). При этом

необходимо учитывать полученные данные по количеству и характеру столкновений между частицами в зависимости от концентрации дисперсной фазы удобрений с учетом их распределения по размерам частиц и массе, скорости частиц в воздушном потоке в различных зонах пневмосистемы посевного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мударисов С.Г., Рахимов З.С., Гареев Р.Т. Моделирование пневматических распределительных систем зерновых сеялок методами двухфазных течений. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018;(4):45–49. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2018-4-45-49>
Mudarisov S.G., Rakhimov Z.S., Gareev R.T. Modeling Pneumatic Distribution Systems of Grain Seed Sowing-Machines by Methods of Two-Phase Flows. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2018;(4):45–49. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2018-4-45-49>
2. Afonso Júnior P.C., Correa P.C., Pinto F.A.C., Queiroz D.M. Aerodynamic Properties of Coffee Cherries and Beans. *Biosystems Engineering*. 2007;98(1):39–46. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.010>
3. Shellard J.E., Macmillan R.H. Aerodynamic Properties of Threshed Wheat Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1978;23(3):273–281. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(78\)90101-4](https://doi.org/10.1016/0021-8634(78)90101-4)
4. Shahbazi F. Aerodynamic Properties of Wild Mustard (*Sinapis Arvensis* L.) Seed for Separation from Canola. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013;93(6):1466–1470. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5916>
5. El-Emam M.A., Zhou L., Shi W., Han Ch., Bai L., Agarwal R. Theories and Applications of CFD-DEM Coupling Approach for Granular Flow: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021;28:4979–5020. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09568-9>
6. Gao X., Xie G., Li J., Shi G., Lai Q., Huang Y. Design and Validation of a Centrifugal Variable-Diameter Pneumatic High-Speed Precision Seed-Metering Device for Maize. *Biosystems Engineering*. 2023;227:161–181. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.02.004>
7. Han D., Zhang D., Yang L., Li K., Zhang T., Wang Y., Cui T. EDEM-CFD Simulation and Experiment of Working Performance of Inside-Filling Air-Blowing Seed Metering Device in Maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017;33(13):23–31. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.004>
8. Hu H., Zhou Z., Wu W., Yang W., Li T., Chang C., et al. Distribution Characteristics and Parameter Optimisation of an Air-Assisted Centralised Seed-Metering Device for Rapeseed Using a CFD-DEM Coupled Simulation. *Biosystems Engineering*. 2021;208:246–259. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.005>
9. Эркинов Р.В., Исмаилова Г.И., Усмонова З.Ш., Хусанова М.Н., Дехканов З.К. Физико-химические свойства аммиачной селитры с добавкой зола. *Universum: технические науки*. 2021;85(4). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2021.85.4-4.68-70>
Erkinov R.V., Ismoilova G.I., Usmonova Z.Sh., Khusanova M.N., Dekhkanov Z.K. Physico-Chemical Properties of Ammonium Nitrate with Ash Addition. *Universum: Technical Sciences*. 2021;85(4). (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32743/UniTech.2021.85.4-4.68-70>
10. Macak M., Křištof K. The Effect of Granulometric Structure and Moisture of Fertilizer on its Static Strength. *Research in Agricultural Engineering*. 2016;62(10):S1–S7. <https://doi.org/10.17221/31/2016-RAE>
11. Исханов И.Г., Зиганшин Б.Г., Халиуллин Д.Т. Дисковый разбрасыватель минеральных удобрений. *Сельский механизатор*. 2017;(6):15–16. <https://elibrary.ru/yqjrjv>
Iskhanov I.G., Ziganshin B.G., Khaliullin D.T. [Disk Spreader of Mineral Fertilizers]. *Sel'skii Mekhanizator*. 2017;(6):15–16. (In Russ.) <https://elibrary.ru/yqjrjv>

12. Yatskul A., Lemièrre J.-P., Cointault F. Influence of the Divider Head Functioning Conditions and Geometry on the Seeds Distribution Accuracy of the Air-Seeder. *Biosystems Engineering*. 2017;161:120–134. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.015>
13. Дринча В.М., Дондиков Ю.Ж., Аммосов И.Н., Слепцов Н.Е. Проблемы и перспективы совершенствования процессов пневмосепарации зерна. *Вестник АГАТУ*. 2023;12(4):92–101. <https://elibrary.ru/mekubp>
Drincha V.M., Dondikov Yu.Zh., Ammosov I.N., Sleptsov N.E. The Problems and Prospects of Development Grain Pneumatic Separation. *Vestnik ASAU*. 2023;12(4):92–101. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/mekubp>
14. Grift T.E., Hofstee J.W. Measurement of Velocity and Diameter of Individual Fertilizer Particles by an Optical Method. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1997;66(3):235–238. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0129>
15. Нуруллин Э.Г., Сычугов Н.П., Каминский Э. К методике расчета аэродинамических транспортеров сыпучих материалов. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012;15(9):177–178. <https://elibrary.ru/oymdfv>
Nurullin E.G., Sychugov N.P., Kaminsky E. [On the Calculation Methodology of Aerodynamic Conveyors of Bulk Materials]. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2012;15(9):177–178. (In Russ.) <https://elibrary.ru/oymdfv>
16. Сычугов Н.П. Влияние числа Рейнольдса на аэродинамическую характеристику диаметральных вентиляторов. *Тракторы и сельхозмашины*. 2016;(1):40–46. <https://elibrary.ru/vhzyrf>
Sychugov N.P. Reynolds Number Effect on the Aerodynamic Characteristic of Transverse Fans. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;(1):40–46. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/vhzyrf>
17. Ямпиллов С.С., Пашинова Н.В. Моделирование аэродинамических свойств семян основных зерновых культур. *Вестник ИрГЦХА*. 2011;42:123–133. <https://elibrary.ru/ndkxwn>
Yampilov S.S., Pashinova N.V. Modeling of Aerodynamic Properties of Main Grain Crop Seeds. *Vestnik IrGSHA*. 2011;42:123–133. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ndkxwn>
18. Мударисов С.Г., Мухаметдинов А.М., Фархутдинов И.М. Обзор параметров и моделей контактов для моделирования семян и гранулированных удобрений методами дискретных элементов. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2024;(197):58–85. <https://elibrary.ru/hrjszq>
Mudarisov S.G., Mukhametdinov A.M., Farkhutdinov I.M. Overview of Contact Parameters and Models for Modeling Seeds and Granular Fertilizers Using Discrete Element Methods. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2024;(197):58–85. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/hrjszq>
19. Mudarisov S., Badretdinov I., Rakhimov Z., Lukmanov R., Nurullin E. Numerical Simulation of Two-Phase “Air-Seed” Flow in the Distribution System of the Grain Seeder. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;168:105151. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105151>

Об авторах:

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

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

Вклад авторов:

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 02.12.2024; поступила после рецензирования 20.12.2024;
принята к публикации 27.12.2024*

About the authors:

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

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

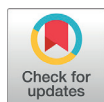
Authors contribution:

A. M. Mukhametdinov – carrying out the studies including the carrying out of experiments and collecting of data, preparing the manuscript, visualizing the results of the study and the data obtained.

S. G. Mudarisov – formulating the study idea, goals and objectives; preparing the manuscript: critical analysis of the manuscript, making comments and corrections, including at the stages before and after publication.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 02.12.2024; revised 20.12.2024; accepted 27.12.2024

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.266-283>EDN: <https://elibrary.ru/nbajrh>

УДК 631.3.06:621

*Оригинальная статья / Original article***Концептуальные основы создания
электрического селекционного комбайна
с комбинированной энергетической установкой****М. Е. Чаплыгин[✉], И. А. Старостин,
А. С. Овчаренко***Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
г. Москва, Российская Федерация*[✉] misha2728@yandex.ru*Аннотация*

Введение. Низкий уровень технического обеспечения селекционных работ приводит к сохранению высокой доли ручного труда в отрасли, нарушению агротехнических требований, повышению потерь дорогостоящего семенного материала, высоким материальным затратам на производство, что является сдерживающим фактором развития отечественной селекции и расширенного воспроизводства посевного материала. Одной из наиболее ответственных операций в селекции и семеноводстве, при которой затрачивается существенное количество энергии и выделяется большой объем отработавших газов, является механизированная уборка селекционных семян, в связи с чем актуально проведение исследований по совершенствованию селекционных комбайнов в направлении повышения качества выполнения уборочных работ и показателей энергосбережения, снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Цель исследования. Повышение качества выполнения технологических операций, энергоэффективности и экологичности селекционных комбайнов путем применения автоматизированного электропривода и гибридной энергетической установки с накопителями электрической энергии.

Материалы и методы. Объектом исследования выступил технологический процесс работы селекционного зерноуборочного комбайна. Основой исследования послужили научные публикации по технологиям механизированной уборки селекционных посевов зерновых культур, информационные материалы предприятий-изготовителей селекционных комбайнов. В процессе исследования использовались такие методы, как системный анализ, структурно-функциональный анализ, синтез.

Результаты исследования. Проведен анализ машинных технологий уборки, технических характеристик и режимов работы современных селекционных зерноуборочных комбайнов, по результатам которого выявлены закономерности энергопотребления при работе селекционного комбайна. Произведен структурный анализ селекционного зерноуборочного комбайна с построением функциональной схемы. С целью повышения его энергоэффективности, качества работы и снижения негативного экологического воздействия на окружающую среду предложено использование

© Чаплыгин М. Е., Старостин И. А., Овчаренко А. С., 2025

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

съемных энергетических модулей с электроприводом, а также применение электропривода агрегатов комбайна. Даны рекомендации по реализации электропривода рабочих органов, предложены варианты использования различных силовых установок, в том числе съемных энергетических модулей, разработана функциональная схема селекционного зерноуборочного комбайна на автоматизированном электроприводе основных узлов с питанием от съемного энергетического модуля.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования способствуют решению задач по повышению энергетической и экономической эффективности, снижению негативного экологического воздействия на окружающую среду при выполнении механизированных уборочных работ в селекции путем применения комбинированной энергетической установки. Использование дополнительного электропривода и буферных накопителей электрической энергии по так называемой гибридной схеме позволяет снизить влияние неравномерных нагрузок, обусловленных особенностями технологического процесса уборки делянок, на работу двигателя внутреннего сгорания, где циклы загрузки с ярко выраженными режимами максимальной мощности, минуя переходные режимы, сменяются периодами незначительного энергопотребления. Определен круг задач для дальнейших исследований, заключающихся в определении оптимальных параметров съемного энергетического модуля и электропривода основных узлов селекционного комбайна методом математического моделирования их энергопотребления на различных режимах работы.

Ключевые слова: селекция, селекционный комбайн, электропривод, гибридная силовая установка, функциональная схема

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чаплыгин М.Е., Старостин И.А., Овчаренко А.С. Концептуальные основы создания электрического селекционного комбайна с комбинированной энергетической установкой. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):266–283. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.266-283>

Conceptual Basis for Developing Electric Plot Combine Harvester with Combined Power-Generating Plant

M. E. Chaplygin , I. A. Starostin,

A. S. Ovcharenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,

Moscow, Russian Federation

 misha2728@yandex.ru

Abstract

Introduction. Low level of technical support for breeding works results in a high share of manual labor in the industry, violation of agrotechnical requirements, increased losses of expensive seeds, high production costs that is a constraint of developing domestic breeding and expanded reproduction of seeds. Machine harvesting of cultivated seeds is a most important operation in breeding and seed production. During this operation, a significant amount of energy is expended and a large volume of exhaust gases is released that makes important conducting the studies on improving plot combine harvesters in the direction of improving the quality of harvesting work and energy saving indicators, and of reducing the negative impact on the environment.

Aim of the Study. The study is aimed at improving the quality of technological operations, energy efficiency and ecological compatibility of plot combine harvesters by using an automated electric drive and a hybrid power-generating plant with electric energy storage units.

Materials and Methods. The object of the study was the technological process of the plot grain combine harvester. The basis of the study was scientific publications on the technologies of machine harvesting of selected grain crops and information materials of the manufacturers of plot combine harvesters. In the process of the study, there were used such methods as system analysis, structural and functional analysis, and synthesis.

Results. There was carried out the analysis of machine harvesting technologies, technical characteristics and operating modes of modern plot grain combine harvesters. Based in its results, there were identified the patterns of energy consumption during the performance of the plot combine harvester. There was carried out structural analysis of the plot grain combine harvester and a functional diagram was constructed. In order to increase its energy efficiency, quality of work and reduce the negative environmental impact, there was proposed the use of removable energy modules with an electric drive and of an electric drive for the combine units. There have been developed the recommendations for using the electric drive of the working bodies, options for using various power plants including removable energy modules, and a functional diagram of a plot grain combine harvester with an automated electric drive of the main units powered by a removable energy module.

Discussion and Conclusion. The studies contribute to solving the problems of increasing energy and economic efficiency, reducing the negative environmental impact when performing machine harvesting operations in breeding through the use of an integrated power plant. The use of additional electric drive and electric energy buffer storages according to a so-called hybrid scheme, allows reducing the impact of unbalanced loads on the internal-combustion engine performance. These unbalanced loads are caused by the peculiarities of the technological process of harvesting plots, where the loading cycles with pronounced modes of maximum power without going through the transitional modes are replaced by periods of insignificant power consumption. There has been defined a set of tasks for further studying. These tasks include determining the optimal parameters of the removable energy module and electric drive of the main units of the plot combine harvester using the method of mathematical simulation of their energy consumption in various operating modes.

Keywords: selection, plot combine harvester, electric drive, hybrid power plant, functional diagram

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

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

For citation: Chaplygin M.E., Starostin I.A., Ovcharenko A.S. Conceptual Basis for Developing of Electric Plot Combine Harvester with Combined Power-Generating Plant. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):266–283. <https://doi.org/10.15507/2658-41.035.202502.266-283>

Введение. В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации¹ необходимо достигнуть уровня самообеспечения по семенам основных сельскохозяйственных культур отечественной селекции не менее 75 %. В соответствии с данными Минсельхоза России² уровень обеспеченности

¹ Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3LsBnp> (дата обращения: 28.09.2024).

² Национальный доклад «О ходе и результатах реализации в 2023 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия». М. : Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, 2024. 119 с. URL: <https://clck.ru/3MHJCp> (дата обращения: 28.09.2024).

отечественными семенами по яровым зерновым и зернобобовым культурам составляет 71,63 %. В текущей сложной геополитической ситуации вопрос производства семян отечественной селекции является одним из ключевых этапов для обеспечения продовольственной безопасности страны.

В реализации селекционной и семеноводческой деятельности одну из ключевых ролей играет технико-технологическое обеспечение работ. По оценкам специалистов³ уровень обеспеченности профильных центров селекционной техникой для подготовки делянок, посева и ухода за посевами не превышает 33 %, для уборки семян – 28 %, для послеуборочной доработки семян – 25 %, а уровень износа техники превышает 70 %. Необходимо также учитывать тот факт, что селекционно-семеноводческая техника является узкоспециализированной и в большинстве случаев создается для решения строго определенных задач [1]. Дефицит данной техники приводит к сохранению высокой доли ручного труда в отрасли, нарушению агротехнических требований, повышению потерь дорогостоящего семенного материала, высоким материальным затратам на производство. Таким образом, низкий уровень технического обеспечения является одним из сдерживающих факторов развития отечественной селекции и расширенного воспроизводства отечественного посевного материала [2].

Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации⁴ поставлены задачи по переходу к высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству, к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике. Одной из наиболее ответственных операций в селекции и семеноводстве, при которой затрачивается существенное количество энергии и выделяется большой объем отработавших газов, является механизированная уборка селекционных семян с помощью селекционных комбайнов. В связи с вышеизложенным актуально проведение исследований в направлении совершенствования селекционных комбайнов по поиску решений, способствующих повышению качества выполнения уборочных работ и показателей энергосбережения, снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Цель исследования – повышение энергетической эффективности и качества выполнения технологических операций, экономических и экологических показателей работы селекционных комбайнов путем снижения влияния на работу его двигателя обусловленных особенностями технологического процесса уборки делянок циклов загрузки за счет использования комбинированной энергетической установки с буферными накопителями электрической энергии.

Обзор литературы. Ключевыми направлениями развития селекционных комбайнов является повышение качества (снижение травмирования и потерь семян), производительности, энергоэффективности и экологичности уборочных работ. Современным решением, нацеленным на повышение качества и производительности

³ Импорт должен быть замещен: Совершенствование нормативно-правовой базы и частные инвестиции – приоритеты в развитии отечественной селекции и семеноводства [Электронный ресурс]. URL: <https://vestnikaprk.ru/articles/importozameshchenie/import-dolzhen-byt-zameshchen/> (дата обращения 25.04.2024).

⁴ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50358> (дата обращения: 28.09.2024).

мобильной сельскохозяйственной техники, является применение средств автоматизации, цифровых технологий и роботизированных систем [3]. Реализация данных решений⁵ обеспечивается за счет применения электронных систем управления [4] и включения в конструкцию мобильной техники элементов управления, осуществляющих регулирование основных параметров во время протекания технологического процесса. Это приводит к усложнению конструкции, при этом применяющиеся технические устройства по изменению, например, скорости и направления движения [5], частоты вращения или колебаний не позволяют в полной мере реализовать потенциал вышеописанных электронных систем, осуществить плавное управление с обеспечением достаточной точности и скорости срабатывания. Решением вышеобозначенных проблем может стать применение электропривода основных узлов селекционного комбайна, который позволяет также снизить выбросы отравляющих веществ в атмосферу и повысить энергоэффективность выполнения работ.

Вопрос применения электропривода в сельскохозяйственных тракторах и зерноуборочных комбайнах затрагивался еще в советское время, но из-за ряда технологических сложностей массового распространения не получил [6]. Результаты последних научных достижений позволяют вернуться к данному вопросу [7; 8] и искать решения поставленных проблем с учетом современного уровня развития технологий.

В исследованиях группы ученых [9] проведен обзор литературы, посвященной гибридным и электрическим силовым установкам в сельскохозяйственной технике. Авторами отмечено, что данная тема недостаточно исследована в академических кругах, хотя и отработана на промышленном уровне. Произведенные расчеты нагрузок, расхода топлива и вредных выбросов при работе трактора на основе смоделированного цикла показывают, что применение гибридных силовых установок с аккумуляторной батареей небольшой емкости является перспективным.

В работе [10] рассмотрены варианты различных схем привода сельскохозяйственных тракторов, в том числе такие, как электропривод только рабочих органов и тяговый привод от двигателя внутреннего сгорания, а также вариант полной электрификации сельскохозяйственных тракторов. Произведенная оценка совокупной стоимости владения показывает, что по сравнению с дизельными тракторами применение электрических тракторов экономически оправдано при выполнении легких сельскохозяйственных работ с нагрузкой на двигатель менее 20 %. С другой стороны, применение тракторов с гибридными силовыми установками экономически оправдано при выполнении работ средней тяжести при нагрузке на двигатель от 20 до 60 %.

Учеными [11] рассмотрена возможность управления гибридным приводом комбайна при помощи искусственного интеллекта. Проведенные имитационные испытания показали, что применение технологий искусственного интеллекта

⁵ 2.5. Разработка интеллектуальной системы управления зерноуборочным комбайном / А. А. Федоров [и др.] // Основы создания нейроцифровых экосистем. Гибридный вычислительный интеллект. Калининград : Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2021. С. 63–68. <https://elibrary.ru/ksuydp>

в управлении гибридным приводом комбайна позволяет снизить затраты электрической энергии на 11 % по сравнению с управлением по заложенной программе.

Авторами публикации [12] рассмотрена перспектива применения электрической и гибридных систем привода в мобильных средствах сельскохозяйственного назначения. Проведенный анализ показывает, что применение рассматриваемых систем позволяет снизить сложность трансмиссии на 60 % и реализовать независимое управление каждым элементом, обеспечивая при этом снижение расхода топлива. Результаты сравнительных исследований показали, что совокупная эффективность комбайнов с электрическим приводом составляет от 72 до 82 %, а с гидростатическим – лишь от 40 до 68 %. Результаты сравнительной оценки производительности обычного специализированного садового трактора и трех различных конфигураций гибридного электрического трактора показали, что применение гибридного привода оправдано и позволяет повысить энергоэффективность. При этом варианты тракторов с параллельными гибридными схемами позволяют обеспечить высокую пиковую мощность, а варианты тракторов с последовательными гибридными схемами обеспечивают более высокую экономию топлива.

Помимо исследования различных схем применения электрического привода в мобильной сельскохозяйственной технике активно проводятся исследования по созданию индивидуального электропривода как отдельных элементов, таких как барабан [13], электрогидравлический актуатор [14], сегментный режущий аппарат жатки [15], так и зерноуборочных комбайнов в целом [16].

Произведенный обзор показывает, что применение в сельскохозяйственных мобильных средствах электрического и гибридного приводов может способствовать решению вышеобозначенных проблем. Проводимые в настоящее время исследования нацелены на разработку, оценку перспектив и эффективности применения электрических и гибридных систем привода сельскохозяйственных мобильных средств. Однако в данных исследованиях не учитываются особенности работы селекционных комбайнов, обусловленные спецификой селекционного процесса.

Материалы и методы. Объектом исследования стал технологический процесс работы селекционного зерноуборочного комбайна. Основой исследования послужили научные публикации по технологиям механизированной уборки селекционных посевов зерновых культур, информационные материалы предприятий-изготовителей селекционных комбайнов. В процессе исследования использовались такие методы, как системный анализ, структурно-функциональный анализ, синтез. Анализировались машинные технологии уборки в селекции и семеноводстве сельскохозяйственных культур, в том числе режимы работы селекционных зерноуборочных комбайнов. Производился системный анализ конструктивных элементов селекционного комбайна с построением функциональной схемы. Осуществлен синтез функциональной схемы селекционного зерноуборочного комбайна на автоматизированном электроприводе основных узлов с питанием от съемного энергетического модуля.

Результаты исследования. Анализ технологии проведения механизированных уборочных работ в селекции и семеноводстве показывает следующее. В соответствии с технологией при переходе с уборки селекционных делянок одного сорта (гибрида) на делянки другого должна обеспечиваться тщательная очистка комбайна от семян с убранных делянок, за счет чего исключаются сортосмешение и засорение. После уборки делянок одного образца селекционный комбайн работает на холостом ходу, очищается (вручную и с применением встроенных систем пневмоочистки) и только после этого приступает к уборке следующей делянки (с другим образцом). В таблице приведен анализ данных хронометража комбайновой уборки селекционных делянок зерновых культур [17].

Т а б л и ц а

T a b l e

**Результаты хронометража комбайновой уборки селекционных делянок
зерновых культур**

**Results of timing of combine harvesting of selection plots
of grain crops**

Технологическая операция / Technological operation	Затраты времени, с / Time spent, s	Доля от времени рабочего цикла, % / Share of working cycle time, %
Подготовка к обмолоту / Preparing for threshing	41...44	24
Прямое комбайнирование / Direct combine harvesting	13...14	8
Остановка, доочистка, смена тары / Stopping, additional cleaning, changing containers	28...30	17
Разворот и переезд к следующей делянке / Turn around and move to the next plot	77...80	43...45
Доочистка хедера / Header additional cleaning	10...15	6...8

Таким образом, в работе энергетической установки селекционного комбайна отмечается цикличность с ярко выраженными режимами максимальной мощности (непосредственно скашивание, транспортирование в зону обмолота и обмолот растений) и режимами с незначительным энергопотреблением (выгрузка семян, очистка), при этом режимы с незначительным потреблением мощности занимают преобладающую часть рабочего времени. Данный факт приводит к снижению эффективности энергетической установки. В то же время такой режим работы может являться существенным резервом для повышения энергоэффективности работы комбайна [18]. Для этого необходимо провести системный анализ конструктивных элементов селекционного комбайна, позволяющий выделить функциональные особенности, за счет которых возможно сократить энергозатраты.

Основной функцией селекционного комбайна является реализация ряда технологических операций, связанных со скашиванием растительной массы,

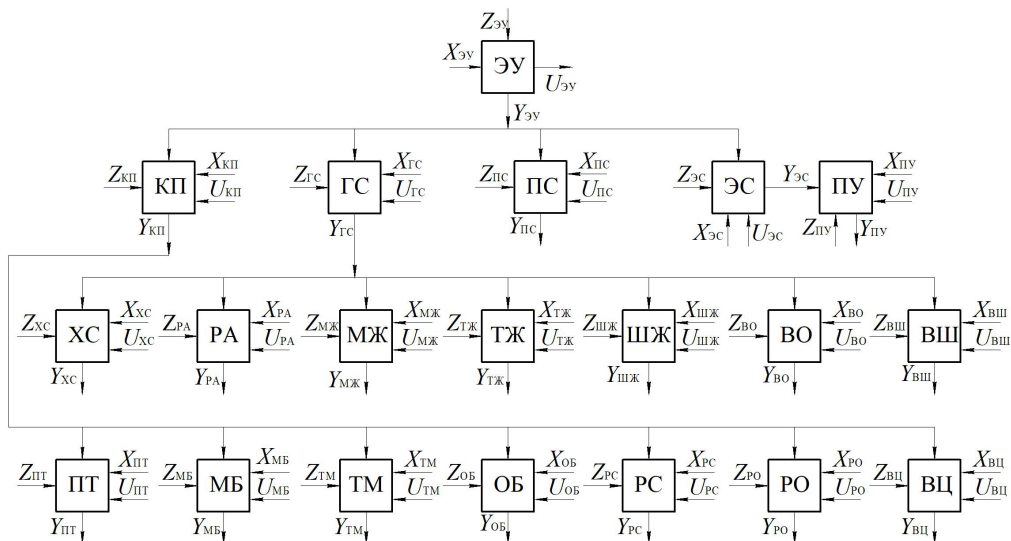
выделением из нее семян культурных растений, их очисткой от примесей, хранением, транспортировкой и выгрузкой в тару или транспортные средства [19].

С точки зрения системного анализа селекционный комбайн можно с одной стороны рассматривать как подсистему селекционного процесса и внешней среды, а с другой – как надсистему совокупности взаимодействующих между собой подсистем, входящих в структуру комбайна.

Уборка селекционных делянок зерновых культур является одним из элементов технологии производства семян. Селекционный комбайн в этом случае выступает в роли устройства для реализации механизированной уборки семян, на данном уровне его возможно рассматривать в виде обобщенного представления системы, не рассматривая внутренние связи и взаимодействия элементов его подсистем. В таком случае комбайн будет выступать как совокупность взаимосвязанных элементов, обособленных от среды и взаимодействующих с ней как единое целое, осуществляющее срез стеблей, их обмолот, сепарацию обмолоченной массы, очистку зерна, накопление зерна в зерновом бункере или затаривание его в мешки, укладку соломы на поле.

В общем случае системный анализ рассматривает взаимодействие объекта с окружающей средой как обмен веществом, энергией и информацией. В процессе функционирования селекционного комбайна как системы в него в качестве «вещества» поступают культурные растения и сорняки с влагой, атмосферный воздух, частицы почвы, иные примеси; в качестве «энергии» – топливо для двигателя, теплота окружающей среды, в качестве «информации» – данные о делянке или участке, убираемой культуре, типе сорняков и засоренности посевов, состоянии почвы, транспорте и т. п. Из селекционного комбайна как системы в качестве «вещества» выходят собранное зерно, солома, солома, полова, пыль, отработавшие газы; в качестве «энергии» – теплота, выделяемая узлами и агрегатами комбайна, вибрация, шум, деформация почвы под воздействием на нее массы комбайна; в качестве «информации» – данные об уровне заполнения бункера зерном, урожайности, влажности зерна, чистоте зерна, потерях, уровне топлива, смазывающих и охлаждающих жидкостей, техническом состоянии узлов и агрегатов и т. д. В таком случае функцию комбайна как подсистемы технологии селекционных работ можно сформулировать как преобразование и передачу во внешнюю среду «вещества» (в первую очередь «семенного зерна») за счет преобразования «энергии»), сжигания «топлива» в двигателе внутреннего сгорания с преобразованием тепловой энергии в механическую, потребляемую функциональными органами комбайна, с получением и передачей во внешнюю среду «информации» о состоянии системы и результатах ее функционирования.

Для изучения селекционного комбайна как совокупности подсистем (функциональных элементов, взаимодействующих между собой и с внешней средой) разработана функциональная схема селекционного зерноуборочного комбайна, которая представлена на рисунке 1. Факторами внутреннего взаимодействия являются возмущающие воздействия, возникающие при функционировании подсистем системы и оказывающие влияние на другие подсистемы и элементы.



Р и с. 1. Функциональная схема селекционного зерноуборочного комбайна

Fig. 1. Functional diagram of a selection grain harvester

Примечание: ЭУ – энергетическая установка; КП – контрпривод; ПТ – приемный ленточный транспортер; МБ – молотильный барабан; ТМ – ленточный транспортер молотилки; ОБ – отбойный бiter; РС – плоскорешетный соломотряс; РО – решето очистки; ВЦ – вентилятор циклона; ГС – гидравлическая система; ХС – ходовая система; РА – режущий аппарат; МЖ – мотовило жатки; ТЖ – ленточный транспортер жатки; ШЖ – шнек жатки; ВО – вентилятор очистки; ВШ – выгрузной шнек; ПС – пневматическая система очистки; ЭС – электрическая система; ПУ – пост управления; $X_{ЭУ}, X_{КП}, X_{ПТ}, X_{МБ}, X_{ТМ}, X_{ОБ}, X_{РС}, X_{РО}, X_{ВЦ}, X_{ГС}, X_{ХС}, X_{РА}, X_{МЖ}, X_{ТЖ}, X_{ШЖ}, X_{ВО}, X_{ВШ}, X_{ПС}, X_{ЭС}, X_{ПУ}$ – функция внешнего воздействия на соответствующий функциональный элемент; $Z_{ЭУ}, Z_{КП}, Z_{ПТ}, Z_{МБ}, Z_{ТМ}, Z_{ОБ}, Z_{РС}, Z_{РО}, Z_{ВЦ}, Z_{ГС}, Z_{ХС}, Z_{РА}, Z_{МЖ}, Z_{ТЖ}, Z_{ШЖ}, Z_{ВО}, Z_{ВШ}, Z_{ПС}, Z_{ЭС}, Z_{ПУ}$ – функция состояния соответствующего функционального элемента; $U_{ЭУ}, U_{КП}, U_{ПТ}, U_{МБ}, U_{ТМ}, U_{ОБ}, U_{РС}, U_{РО}, U_{ВЦ}, U_{ГС}, U_{ХС}, U_{РА}, U_{МЖ}, U_{ТЖ}, U_{ШЖ}, U_{ВО}, U_{ВШ}, U_{ПС}, U_{ЭС}, U_{ПУ}$ – функция управляющего воздействия на соответствующий функциональный элемент (управляющие воздействия осуществляются системой автоматически, либо оператором для обеспечения соответствия требований к техпроцессу); $Y_{ЭУ}, Y_{КП}, Y_{ПТ}, Y_{МБ}, Y_{ТМ}, Y_{ОБ}, Y_{РС}, Y_{РО}, Y_{ВЦ}, Y_{ГС}, Y_{ХС}, Y_{РА}, Y_{МЖ}, Y_{ТЖ}, Y_{ШЖ}, Y_{ВО}, Y_{ВШ}, Y_{ПС}, Y_{ЭС}, Y_{ПУ}$ – результирующие параметры соответствующего функционального элемента.

Note: ЭУ – power plant; КП – countershaft; ПТ – receiving belt conveyor; МБ – threshing drum; ТМ – threshing machine belt conveyor; ОБ – impact beater; РС – flat-sieve straw walker; РО – cleaning sieve; ВЦ – cyclone fan; ГС – hydraulic system; ХС – chassis system; РА – cutting device; МЖ – header reel; ТЖ – header belt conveyor; ШЖ – header auger; ВО – cleaning fan; ВШ – unloading auger; ПС – pneumatic cleaning system; ЭС – electrical system; ПУ – control post; $X_{ЭУ}, X_{КП}, X_{ПТ}, X_{МБ}, X_{ТМ}, X_{ОБ}, X_{РС}, X_{РО}, X_{ВЦ}, X_{ГС}, X_{ХС}, X_{РА}, X_{МЖ}, X_{ТЖ}, X_{ШЖ}, X_{ВО}, X_{ВШ}, X_{ПС}, X_{ЭС}, X_{ПУ}$ – function of external action on the corresponding functional element; $Z_{ЭУ}, Z_{КП}, Z_{ПТ}, Z_{МБ}, Z_{ТМ}, Z_{ОБ}, Z_{РС}, Z_{РО}, Z_{ВЦ}, Z_{ГС}, Z_{ХС}, Z_{РА}, Z_{МЖ}, Z_{ТЖ}, Z_{ШЖ}, Z_{ВО}, Z_{ВШ}, Z_{ПС}, Z_{ЭС}, Z_{ПУ}$ – function of state of the corresponding functional element; $U_{ЭУ}, U_{КП}, U_{ПТ}, U_{МБ}, U_{ТМ}, U_{ОБ}, U_{РС}, U_{РО}, U_{ВЦ}, U_{ГС}, U_{ХС}, U_{РА}, U_{МЖ}, U_{ТЖ}, U_{ШЖ}, U_{ВО}, U_{ВШ}, U_{ПС}, U_{ЭС}, U_{ПУ}$ – the function of control action on the corresponding functional element (control actions are performed automatically by the system or by the operator to ensure compliance with the requirements for the technological process); $Y_{ЭУ}, Y_{КП}, Y_{ПТ}, Y_{МБ}, Y_{ТМ}, Y_{ОБ}, Y_{РС}, Y_{РО}, Y_{ВЦ}, Y_{ГС}, Y_{ХС}, Y_{РА}, Y_{МЖ}, Y_{ТЖ}, Y_{ШЖ}, Y_{ВО}, Y_{ВШ}, Y_{ПС}, Y_{ЭС}, Y_{ПУ}$ – the resulting parameters of the corresponding functional element.

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

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

Произведенный структурно-функциональный анализ показывает, что в селекционном зерноуборочном комбайне можно выделить три основные группы функциональных элементов. К первой группе относятся элементы, связанные непосредственно с реализацией технологического процесса обмолота зерновых культур. К ним укрупненно относятся жатка, молотилка и бункер селекционного комбайна. Вторая группа элементов косвенно связана с процессом обмолота зерновых культур и предназначена для обеспечения нормального функционирования элементов первой группы. Вторая группа включает: энергетическую установку, систему привода рабочих органов, трансмиссию и ходовую систему. К третьей группе функциональных элементов относятся органы и механизмы для реализации управления процессом. Элементы данной группы осуществляют сбор, обработку и передачу оператору или в определенные устройства информации о протекании технологического процесса, состоянии узлов и агрегатов с целью выработки управленческих решений и реализации управляющих воздействий. Рассмотрим, как реализуются отвечающие за получение, преобразование и передачу энергии функциональные элементы второй группы в современных селекционных зерноуборочных комбайнах.

Селекционные комбайны являются узкоспециализированной техникой, поэтому их производство осуществляют несколько компаний во всем мире. В Российской Федерации на базе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ осуществляется совместное производство селекционного комбайна Wintersteiger-ВИМ серий Classic и Delta и ВИМ-110 совместно с компанией Zürn для уборки делянок селекционных и контрольных питомников, питомников предварительного сортоиспытания и испытаний потомств второго года (III этап селекционных работ). На предприятии АО «Агротехмаш» непродолжительное время осуществлялось производство селекционных комбайнов Terrion-Sampo SR2010 финской компании Sampo Rosenlew. Немецкая компания Zürn также является одним из ведущих мировых производителей специализированной селекционной техники, в том числе селекционных комбайнов. Другая восточногерманская компания Fortschritt, входившая ранее в объединение VEB Fortschritt (часть IFA), а в настоящее время входящая в Case IH, осуществляет выпуск селекционных комбайнов Fortschritt MDW Hege 130. Анализ конструкций и характеристик приведенных моделей комбайнов показывает, что выпускающиеся селекционные комбайны оснащаются в основном дизельными двигателями внутреннего сгорания с турбонаддувом и бесступенчатыми двухскоростными гидростатическими трансмиссиями с двумя передачами.

Широкое распространение гидравлического привода в современных селекционных комбайнах обусловлено следующим: убираемые комбайном селекционные семена являются ценным генетическим материалом, на получение которого затрачивается достаточно много материально-технических ресурсов, ручного и интеллектуального труда. В связи с этим при уборке селекционных делянок недопустимы потери семян, их травмирование и смешивание (засорение) с семенами других сортов или гибридов, а также семенами трудноотделимых сорняков. С этой целью необходимо обеспечить точную настройку и контроль работы технологической

части селекционного комбайна, при которых возможно реализовать максимально бережный обмолот, исключая дробление зерна, его потери за жаткой или молотилкой комбайна, что и позволяет сделать гидравлический привод. Применение гидравлического привода по отношению к прямому механическому приводу дает возможность более плавно изменять настройки рабочих органов, реализовывать различные компоновочные решения благодаря возможности подведения трубопроводов к гидромоторам рабочих органов в независимости от их расположения и удаленности от гидронасоса, снимая при этом ряд ограничений, связанных с функциональными возможностями прямой механической передачи. Однако элементы гидравлической системы имеют достаточно высокую стоимость, а на их ресурс существенно влияют свойства и чистота рабочей жидкости, своевременное техническое обслуживание. К тому же гидравлический привод не позволяет реализовать обратное преобразование энергии и ее аккумулирование в больших объемах. Альтернативным путем, позволяющим решить обозначенные недостатки, является применение автоматизированного электропривода основных узлов, дающего возможность быстрой и точной корректировки режима работы селекционного комбайна.

Учитывая режим работы энергетической установки селекционного комбайна, предлагается следующее решение. В настоящее время при работе в неравномерном нагрузочном режиме достаточно хорошо себя проявляют гибридные энергетические установки [16], подключенные параллельно с буферными элементами, способными накапливать энергию при ее избытке и отдавать при ее дефиците. Наибольшее распространение в последнее время получают схемы применения гибридного электропривода с аккумуляторными батареями, которые показывают наибольшую эффективность при использовании транспорта в городском цикле, для которого характерны частые разгоны и торможения. К тому же применение электропривода позволяет наиболее быстро и точно осуществлять управление технологическим процессом, а также эффективно реализовать рекуперацию энергии. Применение рекуперации позволяет преобразовывать различные типы движения в рекуперированную энергию (например, вращение молотильного барабана, обладающего достаточно большим маховым моментом и инерцией).

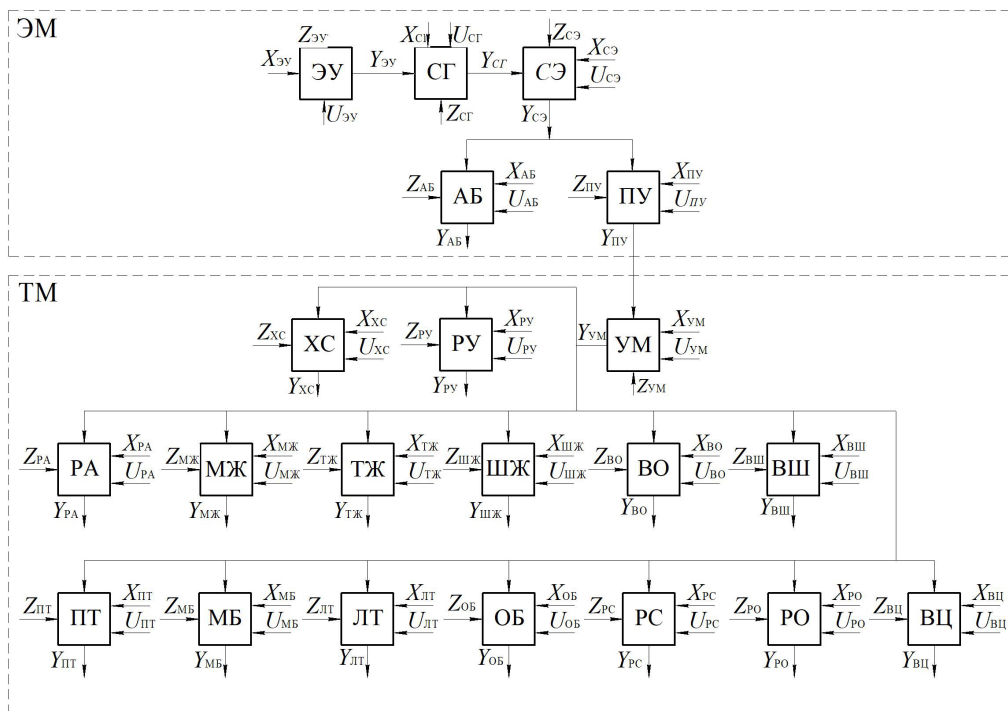
Одной из особенностей эксплуатации селекционных комбайнов является низкая годовая загрузка. В большинстве случаев селекционные комбайны используются не более 200 ч в год (приведенный в источнике [17] пример показывает, что при соблюдении агротехнических сроков уборки зерновых культур селекционный комбайн может эксплуатироваться в течение не более 30 дней в году), что при достаточно высокой их стоимости (более 15 млн руб.) приводит к снижению экономической эффективности применения данной техники. Низкая загрузка селекционных зерноуборочных комбайнов позволяет существенно продлить срок их эксплуатации. Однако при этом необходимо учитывать не только физический износ техники, но и ее моральное устаревание, что особенно важно при реализации современных стремительно развивающихся технологий селекции. Эксплуатация селекционных зерноуборочных комбайнов сверх нормативных

сроков сопряжена с повышенными рисками их выхода из строя в связи с приходом в негодность резинотехнических изделий (уплотнителей, рукавов высокого давления, шин и т. д.), возникновения коррозии основных узлов в результате нарушения рекомендуемых условий хранения.

Повысить экономическую эффективность селекционных комбайнов можно за счет следующих основных способов. Первый способ предусматривает повышение годовой загрузки селекционных комбайнов. Однако на практике реализовать такой способ не представляется возможным, поскольку время проведения уборочных работ, особенно в селекции, жестко регламентировано агротехническими сроками. Второй способ – использование селекционных комбайнов на условиях аренды в селекционно-семеноводческих хозяйствах, расположенных в различных регионах страны (по примеру предоставления в аренду зерноуборочных комбайнов, передвигающихся из южных регионов в северные по мере наступления агротехнических сроков уборки зерновых культур), – сопряжен с высокими рисками потери дорогостоящего селекционного зерна при возникновении малейших административных и логистических трудностей. Третьим способом повышения эффективности селекционного зерноуборочного комбайна является снижение его стоимости путем применения энергетических модулей, которые на время уборочных работ могут быть легко и быстро установлены на селекционный комбайн, а в остальное время могут использоваться для получения энергии в других целях. При переводе селекционного комбайна на автоматизированный электропривод энергетический модуль может представлять из себя бензо- или дизельгенераторную установку с накопителями энергии в виде аккумуляторных батарей.

С учетом внесенных предложений разработана функциональная схема селекционного комбайна на автоматизированном электроприводе основных узлов, питающегося от съемного энергетического модуля (рис. 2). На данной структурно-функциональной схеме энергетическая установка представляет собой двигатель внутреннего сгорания и предназначена для получения механической энергии, которая передается на ротор силового генератора. В силовом генераторе происходит преобразование механической энергии в электрическую. Генерируемая электрическая энергия блоком силовой электроники преобразуется и распределяется в зависимости от нагрузки между аккумуляторными батареями и потребителями. Управление потребителями получаемой электрической энергии осуществляется с помощью блока управления. Предусматривается применение автоматизированного электрического привода ходовой системы, рулевого управления и рабочих органов комбайна. Технологический модуль включает в себя функциональные элементы, связанные с реализацией технологического процесса селекционного комбайна, его передвижением и управлением.

Блок управления технологического модуля осуществляет управление всеми функциональными элементами технологического уборочного модуля. Через данный блок осуществляется питание всех функциональных элементов технологического уборочного модуля.



Р и с. 2. Функциональная схема селекционного зерноуборочного комбайна на автоматизированном электроприводе основных узлов с питанием от съемного энергетического модуля

F i g. 2. Functional diagram of a plot grain combine harvester with an automated electric drive of the main units powered by a removable energy module

Примечание: ЭМ – энергетический модуль; ЭУ – энергетическая установка; СГ – силовой генератор; СЭ – блок силовой электроники; АБ – блок аккумуляторных батарей; ПУ – блок управления энергетическим модулем; ТМ – технологический модуль; УМ – блок управления технологического модуля; ХС – ходовая система; РУ – рулевое управление; РА – режущий аппарат; МЖ – мотовило жатки; ТЖ – ленточный транспортер жатки; ШЖ – шнек жатки; ВО – вентилятор очистки; ВШ – выгрузной шнек; ПТ – приемный ленточный транспортер; МБ – молотильный барабан; ЛТ – ленточный транспортер молотилки; ОБ – отбойный битей; РС – плоскорешетный соломотряс; РО – решето очистки; ВЦ – вентилятор циклона; $X_{\text{ЭУ}}, X_{\text{СГ}}, X_{\text{СЭ}}, X_{\text{АБ}}, X_{\text{ПУ}}, X_{\text{УМ}}, X_{\text{ХС}}, X_{\text{РУ}}, X_{\text{РА}}, X_{\text{МЖ}}, X_{\text{ТЖ}}, X_{\text{ШЖ}}, X_{\text{ВО}}, X_{\text{ВШ}}, X_{\text{ПТ}}, X_{\text{МБ}}, X_{\text{ЛТ}}, X_{\text{ОБ}}, X_{\text{РС}}, X_{\text{РО}}, X_{\text{ВЦ}}$ – функция внешнего воздействия на соответствующий функциональный элемент; $Z_{\text{ЭУ}}, Z_{\text{СГ}}, Z_{\text{СЭ}}, Z_{\text{АБ}}, Z_{\text{ПУ}}, Z_{\text{УМ}}, Z_{\text{ХС}}, Z_{\text{РУ}}, Z_{\text{РА}}, Z_{\text{МЖ}}, Z_{\text{ТЖ}}, Z_{\text{ШЖ}}, Z_{\text{ВО}}, Z_{\text{ВШ}}, Z_{\text{ПТ}}, Z_{\text{МБ}}, Z_{\text{ЛТ}}, Z_{\text{ОБ}}, Z_{\text{РС}}, Z_{\text{РО}}, Z_{\text{ВЦ}}$ – функция состояния соответствующего функционального элемента; $U_{\text{ЭУ}}, U_{\text{СГ}}, U_{\text{СЭ}}, U_{\text{АБ}}, U_{\text{ПУ}}, U_{\text{УМ}}, U_{\text{ХС}}, U_{\text{РУ}}, U_{\text{РА}}, U_{\text{МЖ}}, U_{\text{ТЖ}}, U_{\text{ШЖ}}, U_{\text{ВО}}, U_{\text{ВШ}}, U_{\text{ПТ}}, U_{\text{МБ}}, U_{\text{ЛТ}}, U_{\text{ОБ}}, U_{\text{РС}}, U_{\text{РО}}, U_{\text{ВЦ}}$ – функция управляющего воздействия на соответствующий функциональный элемент (управляющие воздействия осуществляются системой автоматически, либо оператором для обеспечения установленным требованиям); $Y_{\text{ЭУ}}, Y_{\text{СГ}}, Y_{\text{СЭ}}, Y_{\text{АБ}}, Y_{\text{ПУ}}, Y_{\text{УМ}}, Y_{\text{ХС}}, Y_{\text{РУ}}, Y_{\text{РА}}, Y_{\text{МЖ}}, Y_{\text{ТЖ}}, Y_{\text{ШЖ}}, Y_{\text{ВО}}, Y_{\text{ВШ}}, Y_{\text{ПТ}}, Y_{\text{МБ}}, Y_{\text{ЛТ}}, Y_{\text{ОБ}}, Y_{\text{РС}}, Y_{\text{РО}}, Y_{\text{ВЦ}}$ – результирующие параметры соответствующего функционального элемента.

Note: ЭМ – energy module; ЭУ – energy plant; СГ – power generator; СЭ – power electronics unit; АБ – battery pack; ПУ – energy module control unit; ТМ – technological module; УМ – technological module control unit; ХС – chassis system; РУ – steering; РА – cutting device; МЖ – header reel; ТЖ – header belt conveyor; ШЖ – header auger; ВО – cleaning fan; ВШ – unloading auger; ПТ – receiving belt conveyor; МБ – threshing drum; ЛТ – threshing belt conveyor; ОБ – impact beater; РС – flat-sieve straw

walker; PO – cleaning sieve; БЦ – cyclone fan; $X_{\Delta y}, X_{CT}, X_{C3}, X_{AB}, X_{ПУ}, X_{УМ}, X_{XC}, X_{PY}, X_{PA}, X_{MЖ}, X_{ТЖ}, X_{ШЖ}, X_{BO}, X_{ВШ}, X_{ПТ}, X_{MB}, X_{ЛТ}, X_{OB}, X_{PC}, X_{PO}, X_{BC}$ – function of external action on the corresponding functional element; $Z_{\Delta y}, Z_{CT}, Z_{C3}, Z_{AB}, Z_{ПУ}, Z_{УМ}, Z_{XC}, Z_{PY}, Z_{PA}, Z_{MЖ}, Z_{ТЖ}, Z_{ШЖ}, Z_{BO}, Z_{ВШ}, Z_{ПТ}, Z_{MB}, Z_{ЛТ}, Z_{OB}, Z_{PC}, Z_{PO}, Z_{BC}$ – function of state of the corresponding functional element; $U_{\Delta y}, U_{CT}, U_{C3}, U_{AB}, U_{ПУ}, U_{УМ}, U_{XC}, U_{PY}, U_{PA}, U_{MЖ}, U_{ТЖ}, U_{ШЖ}, U_{BO}, U_{ВШ}, U_{ПТ}, U_{MB}, U_{ЛТ}, U_{OB}, U_{PC}, U_{PO}, U_{BC}$ – function of control action on the corresponding functional element (control actions are performed by the system automatically or by the operator to ensure the established requirements); $Y_{\Delta y}, Y_{CT}, Y_{C3}, Y_{AB}, Y_{ПУ}, Y_{УМ}, Y_{XC}, Y_{PY}, Y_{PA}, Y_{MЖ}, Y_{ТЖ}, Y_{ШЖ}, Y_{BO}, Y_{ВШ}, Y_{ПТ}, Y_{MB}, Y_{ЛТ}, Y_{OB}, Y_{PC}, Y_{PO}, Y_{BC}$ – resulting parameters of the corresponding functional element.

Обсуждение и заключение. Проведенный анализ механизированной технологии уборки селекционных делянок показал, что в работе энергетической установки селекционного комбайна отмечается цикличность с ярко выраженными режимами максимальной мощности и незначительного энергопотребления, которые могут быть использованы для повышения энергоэффективности технологического процесса. Проведенный структурно-функциональный анализ позволил определить отвечающие за получение, преобразование и передачу энергии группы функциональных элементов селекционного комбайна, за счет которых возможно повысить энергоэффективность. Режущий аппарат, мотовило, ленточный транспортер и шнек жатки могут быть оснащены как индивидуальным приводом, так и общим электроприводом с применением механических передач. При этом необходимо обеспечить возможность индивидуального изменения частоты вращения мотовила жатки. Для обеспечения возможности точного и быстрого управления технологическим процессом ленточный транспортер молотилки, молотильный барабан, отбойный битей, плоскорешетный соломотряс, решето очистки, вентилятор очистки и вентилятор циклона целесообразно оснащать индивидуальным приводом. Использование индивидуального привода молотильного барабана и отбойного битера позволяет реализовать рекуперацию их энергии вращения. Электропривод выгрузного шнека целесообразно делать индивидуальным.

Проведенные исследования способствуют решению задач по повышению энергетической и экономической эффективности, снижению негативного экологического воздействия на окружающую среду при выполнении механизированных уборочных работ в селекции путем применения комбинированной энергетической установки, позволяющей снизить влияние на работу двигателя внутреннего сгорания обусловленных особенностями технологического процесса уборки делянок циклов загрузки с ярко выраженными режимами максимальной мощности, незначительного энергопотребления и переходными процессами между ними за счет использования буферных накопителей электрической энергии.

В результате проведенных исследований предложены решения по применению в селекционном комбайне автоматизированного электропривода и съемного энергетического модуля, способствующих повышению качества выполнения уборочных работ, их энергетической и экономической эффективности. Разработана функциональная схема селекционного комбайна на автоматизированном электроприводе основных узлов с питанием от съемного энергетического модуля и даны рекомендации по реализации привода рабочих органов.

При осуществлении дальнейших исследований одной из важных задач является определение оптимальных параметров энергетического модуля для работы с селекционным комбайном с автоматизированным электроприводом основных узлов путем математического моделирования их энергопотребления на различных режимах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Жалнин Э.В., Чаплыгин М.Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(3):403–416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the Design of Combine Harvesters by Harmonizing Their Basic Technical Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):403–416. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
2. Давыдова С.А., Чаплыгин М.Е. Техническая оснащенность селекции и семеноводства кукурузы. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020;14(3):66–74. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-66-74>
Davydova S.A., Chaplygin M.E. Technical Equipment of Corn Breeding and Seed Production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):66–74. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-66-74>
3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021;15(4):6–10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital Technologies and Robotic Devices in the Agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Моисеев Г.В., Соловьев В.И. Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(1):25–34. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34>
Khort D.O., Kutyrav A.I., Smirnov I.G., Moiseev G.V., Soloviev V.I. Agricultural Autonomous Robotic Platform Motion Control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):25–34. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34>
5. Годжаев З.А., Крюковская Н.С., Сенькевич С.Е. Разработка стенда для испытания системы управления беспилотным зерноуборочным комбайном. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2020;20(3):5–14. <https://elibrary.ru/xmqjjw>
Godzhaev Z.A., Kryukovskaya N.S., Senkevich S.E. Unmanned Combine Harvester Control System Test Stand Development. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. 2020;20(3):5–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/xmqjjw>
6. Ценч Ю.С., Шаров В.В. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024;18(3):4–13. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13>
Tsench Yu.S., Sharov V.V. Advancement of Domestic Mobile Agricultural Machinery Powered by Electric Traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(3):4–13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13>
7. Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я. Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020;21(4):260–270. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

- Lachuga Yu.F., Strebkov D.S., Godzhaev Z.A., Redko I.Ya. Electrification of Agricultural Mobile Power Facilities Based on the Traction and Energy Concept of Technology Development. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2020;21(4):260–270. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>
8. Юфёрев Л.Ю., Споров А.П., Гусаров В.А., Писарев Д.Ю. Тенденции развития сельскохозяйственной электрифицированной мобильной техники. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022;69(1):3–8. <https://elibrary.ru/sgjmph>
Yuferev L.Y., Sporov A.P., Gusarov V.A., Pisarev D.Y. Trends in the Development of Agricultural Electrified Mobile Equipment. *Electrotechnology and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2022;69(1):3–8. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/sgjmph>
 9. Perez Estevez M.A., Frigola J.M., Llobet J.A., Alberti L., Renzi M. Optimal Design of a Series Hybrid Powertrain for an Agricultural Tractor. *Energy Conversion and Management: X*. 2024;24:100789. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100789>
 10. Ali D., de Castro R., Ehsani R., Vougioukas S., Wei P. Unlocking the Potential of Electric and Hybrid Tractors Via Sensitivity and Techno-Economic Analysis. *Applied Energy*. 2025;377C:124545. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124545>
 11. Weng S., Yuan C., He Y., Shen J., Chen L., Xu L., et al. Neural Network Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Combine Harvesters Based on Quasi-Periodic Samples. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;136B:109051. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109051>
 12. Zhu Z., Chai X., Xu L., Quan L., Yuan C., Tian S. Design and Performance of a Distributed Electric Drive System for a Series Hybrid Electric Combine Harvester. *Biosystems Engineering*. 2023;236:160–174. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.10.015>
 13. Музыченко А.Н., Басакин З.Е. Сравнение концепций электропривода управления вариатором барабана с гидравлическим приводом. *Научный аспект*. 2024;34(2):4233–4239. <https://elibrary.ru/lqmsqc>
Muzychenko A.N., Basakin Z.E. [Comparison of Electric and Hydraulic Drive Concepts for Drum Variator Control]. *Nauchnyy Aspekt*. 2024;34(2):4233–4239. (In Russ.) <https://elibrary.ru/lqmsqc>
 14. Назаренко Д.В., Большев В.Е., Грищенко В.И., Ивлиев Е.А., Медведев Д.Д. Разработка электрогидравлического актуатора для сельскохозяйственной техники. *Аграрный научный журнал*. 2024;(9):134–146. <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp134-146>
Nazarenko D.V., Bolshev V.E., Grishchenko V.I., Ivliev E.A., Medvedev D.D. Development of an Electrohydraulic Actuator for Agricultural Equipment. *Agrarian Scientific Journal*. 2024;(9):134–146. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp134-146>
 15. Леонтьев Д.С., Аипов Р.С., Камалов Т.И. Модернизация привода сегментного режущего аппарата жатки зерноуборочного комбайна. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2022;(1):110–115. <https://elibrary.ru/gjfoxw>
Leontiev D.S., Aipov R.S., Kamalov T.I. Improving the Drive of the Segmented Cutterbar of the Harvesting Header. *Vestnik Bashkirskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2022;(1):110–115. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/gjfoxw>
 16. Чаплыгин М.Е., Годжаев З.А., Уютов С.Ю. Обоснование параметров и режимов работы электропривода базовых рабочих органов селекционного комбайна. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2024;17(1):112–124. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_1_112
Chaplygin M.E., Godzhaev Z.A., Uyutov S.Yu. Engineered Estimation of the Parameters and Operating Modes of the Electric Drives of the Threshing Working Bodies of the Selection Combine Harvester. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(1):112–124. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_1_112
 17. Измайлов А.Ю., Евтюшенков Н.Е., Рожин В.Ф. Разработка математического аппарата для моделирования технологий по транспортированию селекционного урожая. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2015;(6):14–16. <https://elibrary.ru/uosuo>

- Izmailov A.Yu., Yevtyushenkov N.Ye., Rozhin V.F. Elaboration of Mathematical Device for Modeling Technologies for Transportation of Selective Yield. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2015;(6):14–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/uosuo>
18. Жалнин Э.В., Чаплыгин М.Е. Динамика фракционного состава зерносоматической массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(2):249–262. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>
- Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Dynamics of Fractional Composition of Grain-and-Straw Mass Being Threshed in the Threshing Mechanism of a Combine Harvester. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):249–262. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>
19. Чаплыгин М.Е., Чулков А.С., Степанов К.А. Способы передвижения транспортного средства в поле при подборе груза. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022;69(4):37–43. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-4-37-43>
- Chaplygin M.E., Chulkov A.S., Stepanov K.A. Movement of the Vehicle in the Field When Picking Up Cargo. *Electrotechnology and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2022;69(4):37–43. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-4-37-43>

Об авторах:

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: [AAZ-6056-2020](https://orcid.org/AAZ-6056-2020), Scopus ID: [57211741695](https://orcid.org/57211741695), SPIN-код: [2268-6927](https://orcid.org/2268-6927), misha2728@yandex.ru

Старостин Иван Александрович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией прогнозирования развития систем машин и технологий в АПК Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, SPIN-код: [7301-6845](https://orcid.org/7301-6845), starwan@yandex.ru

Овчаренко Александр Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1407-6757>, peterbilt@list.ru

Вклад авторов:

М. Е. Чаплыгин – научное руководство; формулирование основной концепции исследования, целей и задач; анализ литературных источников; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

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

А. С. Овчаренко – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 13.12.2024; поступила после рецензирования 27.12.2024;
принята к публикации 17.01.2025*

About the authors:

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

Ivan A. Starostin, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Laboratory for Forecasting the Development of Machine Systems and Technologies in the Agro-Industrial Complex, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Passage, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, SPIN-code: 7301-6845, starwan@yandex.ru

Alexander S. Ovcharenko, Junior Research Assistant of the Laboratory Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Passage, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1407-6757>, peterbilt@list.ru

Authors contribution:

M. E. Chaplygin – scientific leadership; formulating the main concept, goals and objectives of the study; analyzing literary sources; revising the manuscript; developing specific and general conclusions.

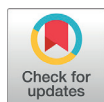
I. A. Starostin – conducting the study, specifically carrying out the experiments and collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing the data.

A. S. Ovcharenko – conducting the study, specifically carrying out the experiments and collecting data; preparing and presenting the manuscript, writing the draft manuscript (including its translation into the English language).

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 13.12.2024; revised 27.12.2024; accepted 17.01.2025

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.284-297>

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

УДК 633.521:62-41

Оригинальная статья / Original article

Анализ процессов формирования и сохранения прямолинейности лент растений при уборке льна

А. Н. Зинцов¹, М. М. Ковалев²✉, Г. А. Перов²

¹ Костромская государственная сельскохозяйственная академия,
п. Караваяево, Российская Федерация

² Федеральный научный центр лубяных культур,
г. Тверь, Российская Федерация

✉ m.kovalev@fncl.ru

Аннотация

Введение. Эффективность льноводства во многом зависит от степени механизации уборочных процессов. Высокая производительность льноподборщиков с минимальными потерями продукции может быть обеспечена только при работе на прямолинейных лентах растений.

Цель исследования. Повышение качества расстила лент льна при выполнении механизированных уборочных процессов.

Материалы и методы. Разработано новое устройство для принудительного расстила ленты растений, рабочее пространство которого образовано активной боковой кромкой плоского ремня с выступами и прижимным механизмом, состоящим из прутков, шарнирно закрепленных друг за другом с возможностью подъема своих прижимных поверхностей под воздействием перемещаемого слоя растений льна. Для оценки эффективности инновационного технического решения предлагаемое устройство смонтировано на подборщик-оборачиватель ОКП-1,5К и проверено в производственных условиях.

Результаты исследования. Установлено, что отсутствие принудительного сопровождения массы стеблей при расстиле генерирует беспорядочные искривления ленты стеблей в диапазоне частот от $\omega_{cp} = 0,512$ до $\omega_{cp} = 0,712$ м⁻¹. Расширение частотного спектра происходит в результате действий ветра и колебаний машины на подсушенную массу стеблей с незначительным сохранением прямолинейности ленты на уровне 45 %. Применение нового расстильного устройства полностью защищает процесс расстила от указанных воздействий и более эффективно сохраняет прямолинейность обработанных лент (на уровне 73 %). В этом случае появление новых низкочастотных колебаний обусловлено только траекторией движения подборщика-оборачивателя.

Обсуждение и заключение. Влияние нового расстильного устройства на сохранение прямолинейности ленты стеблей оценивается положительно и может обеспечить повышение производительности льноподборщиков, пропорциональное снижение эксплуатационных затрат на единицу наработки и уменьшить себестоимость продукции.

© Зинцов А. Н., Ковалев М. М., Перов Г. 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: лен-долгунец, льноподборщик, лента льна, прямолинейность ленты, расстильное устройство, прижимные прутки, колебания машины, полоса основных частот

Финансирование: работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНИЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Анализ процессов формирования и сохранения прямолинейности лент растений при уборке льна. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):284–297. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.284-297>

Analyzing the Process of Formation and Retaining of Straightness of Flax Stem Strips during Flax Harvesting

A. N. Zintsov^a, M. M. Kovalev^b✉, G. A. Perov^b

^a*Kostroma State Agricultural Academy,
Karavaevo, Russian Federation*

^b*Federal Research Center for Bast Crops,
Tver, Russian Federation*

✉ m.kovalev@fnclk.ru

Abstract

Introduction. The effectiveness of flax cultivation largely depends on the degree of mechanization of harvesting processes. At the same time, a high productivity of flax stem pick-ups with minimal product losses can be ensured only when working on straight flax stem strips. **Aim of the Study.** The study is aimed at improving the quality of spreading flax stem strips when performing machine harvesting.

Materials and Methods. To achieve this goal, a new device has been developed for controlled spreading of flax stem strips. The working space of the device is formed by the active side edge of a flat belt with protrusions and a clamping mechanism consisting of rods pivotally fixed to each other with the possibility of lifting their clamping surfaces under the influence of a moving layer of flax stems. To evaluate the effectiveness of an innovative technical solution, the proposed device is mounted on an OKP-1.5K turner and tested under production conditions.

Results. It has been found that the absence of controlled tracking of the mass of flax stems during spreading generates irregular curvature of the flax stem strip in the frequency range from $\omega_{cp} = 0,512$ to $\omega_{cp} = 0,712 \text{ m}^{-1}$. The expansion of the frequency spectrum occurred as a result of the effects of wind and machine vibrations on the dried mass of flax stems, with retaining a slight straightness of the flax stem strip at a level of only 45%. At the same time, the use of a new spreading device completely protects the spreading process from these influences and retains the straightness of the treated flax stem strips more effectively (at the level of 73%). In this case, the appearance of new low-frequency oscillations is caused only by the trajectory of the pick-up turner.

Discussion Conclusions. The impact of the new spreading device on retaining the straightness of flax stem strips is positive that will ensure an increase in the productivity of flax pick-ups, a proportional reduction in operating costs per unit of operation and reduce the production costs.

Keywords: flax, flax pick-up, flax stem strip, straightness of flax stem strips, spreading device, hold down rods, machine vibrations, fundamental frequency band

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

Funding: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment for the Federal Scientific Center for Bast Crops (No. FGSS-2022-0005).

For citation: Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Analyzing the Process of Formation and Retaining of Straightness of Flax Stem Strips During Flax Harvesting. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):284–297. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.284-297>

Введение. Современные условия развития агробизнеса в Нечерноземной зоне России характеризуются сокращением трудоспособного населения на сельских территориях [1]. В начале XXI в. обозначенные условия в совокупности с непопулярностью ручного труда разрушительным образом отразились на отрасли льноводства, так как возделывание и главным образом уборка льна-долгунца являются самыми трудоемкими в ряду основных сельскохозяйственных производств¹. Поэтому понятие «комплексная механизация технологических процессов» приобретает в настоящее время особенную актуальность и первостепенное значение для получения конкурентоспособной льнопродукции [2–4]. Ручной труд должен сводиться лишь к управлению льноуборочными машинами. Для успешной реализации обозначенного требования каждая такая машина при своей работе должна создавать наиболее удобные условия для выполнения последующей механизированной операции [5; 6]. Такие удобства состоят в высоком качестве сформированных и разостланных лент стеблей льна. Прямолинейные ленты без перекосов и сгуживания в них стеблей являются залогом высокопроизводительного использования льноподборщиков с минимальными потерями льнопродукции. Например, многолетние хронометражные наблюдения за работой подборщик-очесывателя ПОЛ-1,5К показывают, что при подборе прямолинейных лент средняя производительность этой машины в час оперативного времени повышается с 0,64 до 0,88 га². Необходимость оправки обусловлена нарушениями прямолинейности с усилением кривизны расстилаемых лент, самопроизвольными переворачиваниями слоя стеблей, различными перекосами и сгуживанием стеблей, приводящими в своей совокупности к невозможности полной механизации уборочных процессов. При уборке льна по двухфазной технологии с применением подборщиков-очесывателей, а также при выполнении последующих механизированных операций по приготовлению льнотресты в поле указанная ситуация усугубляется в большей мере, так как в этих случаях льноподборщики имеют дело с подсушенными, то есть облегченными растениями, а значит и более подверженными влиянию

¹ Смирнов Н. А., Смирнов С. В., Лобачев А. А. Возможные направления развития технологии уборки льна-долгунца // Инновационные разработки производства и переработки лубяных культур : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (19 – 20 мая 2016 г., г. Тверь). Тверь : Тверской государственный университет, 2016. С. 163–166. <https://elibrary.ru/xevand>; Машинно-технологическое обеспечение возделывания и переработки прядильных культур / Р. А. Ростовцев [и др.] : моногр. М. : Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению АПК, 2020. 156 с. <https://elibrary.ru/ehkqkf>

² Любимов В. П. Исследование процессов формирования слоя и расстила льносолумы для обоснования рациональной схемы льнорасстилочной машины : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кострома, 1971. 20 с.

ветровой нагрузки и колебаний машины. Вместе с этим указанные нарушения приводят к частичной или полной потере количества и качества продукции [7–9]. Ученые льноводы установили [10], что большинство таких дефектов возникает на пассивном расстилочном щите льноуборочных машин при бесконтрольном движении массы стеблей, поэтому при организации уборки следует отдавать предпочтение техническим средствам, производящим принудительный расстил стеблей максимально близко к поверхности поля³ [10].

Таким образом, целью работы является повышение качества расстила лент льна при выполнении механизированных уборочных операций.

Обзор литературы. В разные годы было предложено множество технических решений⁴ [11; 12], в ряду которых наиболее проверенным оказалось одновременное устройство для принудительного расстила (УПР) ленты растений [13–15]. Рабочее пространство данного УПР выполнено в виде транспортирующего канала, образованного боковой кромкой плоского расстилочного ремня, имеющей волнообразные выступы, и шарнирно закрепленными жесткими прутками, объединенными в полз, способный подниматься под воздействием стеблевой массы [15–17]. Такая конструкция реализована в опытных вариантах теребилки-плющилки ТПЛ-4К, подборщика-очесывателя ПОЛ-1,5К и подборщика-оборачивателя ОКП-1,5К, разработанных в Костромской ГСХА с участием ученых и конструкторов Федерального научного центра лубяных культур. Несколько позже, в период с 2004 по 2006 гг., ОАО «Нагорьевская сельхозтехника» оборудовало одноремными УПР 19 льноуборочных комбайнов. Однако в ходе производственных проверок установлено, что жесткие прутки не обеспечивают надежного зажима стеблей по всей длине транспортирующего канала расстилочного устройства при неизбежных изменениях толщины ленты. Вход в такой канал более толстой ленты стеблей вызывает подъем пруткового полоза и увеличение зазора по всей длине устройства. При этом ослабевает зажим перемещающейся по каналу более тонкой ленты, подобранной ранее. Центробежные силы, возникающие в слое стеблей при его расстиле и направленные перпендикулярно к траектории движения [14–16], вызывают смещение или выбрасывание не зажатой части тонкого слоя из канала в направлении перпендикулярном направлению движения агрегата, увеличивая тем самым искривления разостланной ленты. В случае подбора более тонкой ленты, она попадает в увеличенный зазор транспортирующего канала, образованный более толстым слоем стеблей, подобранных ранее, что также не обеспечивает надежного зажима стеблей и вызывает аналогичный предыдущему эффект. Для устранения отмеченных недостатков при транспортировании и оборачивании неравномерных по толщине лент льна прижимные прутки состоят из отдельных малых прутков, консольно закрепленных на балке со смещением каждого прутка относительно соседнего, который является его продолжением [18]. К недостаткам данного устройства можно отнести ограниченную возможность изменения установленного зазора между столом и прутками из-за жесткости прутков.

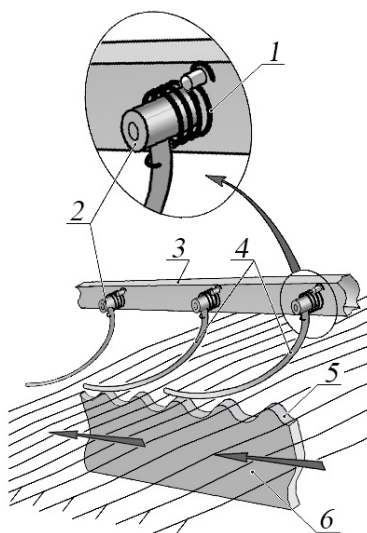
³ Любимов В. П. Исследование процессов формирования слоя и расстила льносоломой для обоснования рациональной схемы льнорасстилочной машины.

⁴ Толстушко М. М., Хайліс Г. А., Толстушко Н. О. Розстиральні пристрої льноозбиральних машин : моногр. Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2014. 160 с.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи: 1) разработка прижимного устройства, обеспечивающего высокую технологическую надежность одновременного УПР путем равномерного зажима ленты стеблей льна по всей длине транспортирующего канала; 2) оценка влияния модернизированного УПР на сохранение прямолинейности ленты стеблей.

Объектом исследования стал процесс расстила ленты стеблей льна-долгунца; предметом – параметры кривизны ленты стеблей льна-долгунца.

Повысить качество расстила ленты стеблей льна и технологическую надежность одновременного УПР можно путем применения прижимного устройства (рис. 1), выполненного в виде прутков 4, расположенных на дополнительной балке 3 последовательно, друг за другом над всей боковой кромкой 5 расстилочного ремня 6, имеющей волнообразные выступы. При этом каждый прижимной пруток 4 независимо друг от друга присоединен передним концом к дополнительной балке 3 посредством шарнира 2 с возможностью подъема своей прижимной поверхности относительно рабочей поверхности 5 ремня 6 под воздействием перемещаемого слоя растений льна. Прижимная поверхность каждого прутка 4 имеет форму выпуклой кривой, а сила прижатия прутка 4 к рабочей поверхности 5 ремня 6 обеспечивается упругим элементом 1, например, пружиной кручения или резиновой пластиной.



Р и с. 1. Схема прижимного устройства для принудительного расстила :
1 – упругий элемент; 2 – шарнир; 3 – дополнительная балка; 4 – прижимной пруток;
5 – рабочая поверхность; 6 – ремень

F i g. 1. Diagram of the clamping device for controlled spreading:
1 – elastic element; 2 – hinge; 3 – additional beam; 4 – clamping rod; 5 – working surface; 6 – belt

Источник: рисунки 1, 3, 4 составлены авторами статьи.

Source: figures 1, 3, 4 are compiled by the authors of the article.

При работе льноуборочной машины лента растений льна после выхода из последнего рабочего органа поступает на вход УПР в транспортирующий канал,

образованный боковой кромкой 5 плоского расстилочного ремня 6, имеющей выступы, и прижимными прутками 4. Прижимные поверхности прутков 4 благодаря шарнирному соединению 2 с дополнительной балкой 3 и силам упругой деформации элементов 1 последовательно и надежно прижимают ленту растений льна к рабочей поверхности 5 ремня 6. В таком зажатом состоянии лента растений активно перемещается к поверхности поля. Движение ремня 6 по заданной траектории осуществляется за счет системы шкивов и роликов (на схеме не показаны). Увеличение толщины расстилаемой ленты под прижимной поверхностью первого прутка 4 вызовет его поворот на шарнире 2 с подъемом над поверхностью ремня 5 и увеличением деформации упругого элемента 1, что обеспечит соответствующее возрастание силы прижатия стеблей прутком 4 к поверхности ремня 5. При последующем движении утолщенный участок массы стеблей попадает в зажим следующего прижимного прутка 4. Аналогичным образом описанный процесс повторяется под каждым последующим прутком 4 до выхода стеблей из транспортирующего канала на поверхность поля.

Таким образом, повышение надежности и качества работы расстилочных устройств льноуборочных машин будет обеспечено благодаря надежному зажиму стеблей на всем пути перемещения слоя растений льна транспортирующим каналом к поверхности поля, что позволит формировать и сохранять прямолинейность разостланных лент растений, тем самым повышая производительность льноподборщиков, увеличивая сбор и качество продукции.

Для оценки эффективности технического решения было изготовлено предлагаемое УПР с новым прижимным устройством и смонтировано на подборщик-оборачиватель ОКП-1,5К (рис. 2).



а)



б)

Р и с. 2. Подборщик-оборачиватель ОКП-1,5К:

а) вид спереди; б) вид на устройство для принудительного расстила

F i g. 2. ОКП-1.5K pick-up turner:

а) front view; б) view of the device for controlled spreading

Источник: фотографии сделаны А. Н. Зинцовым при полевых экспериментах в 2024 г.
Source: the photos were taken by A. N. Zintsov in 2024 during field experiments.

Влияние модернизированного УПР на предмет исследования изучали в сравнении следующих вариантов формирования и расстила ленты стеблей:

1) теребление растений с одновременным очесом семенных коробочек и расстилом стеблей в ленту серийным льноуборочным комбайном ЛК-4А (базовый вариант 1);

2) оборачивание лент стеблей подборщиком-оборачивателем ОКП-1,5К с модернизированным УПР (вариант 2);

3) оборачивание лент стеблей подборщиком-оборачивателем ОКП-1,5К с отключенным прижимным устройством УПР (вариант 3).

Программа экспериментальных исследований предусматривала получение первичной информации в виде последовательностей числовых значений ординат y_k расположения комлевых частей лент стеблей на поверхности поля относительно базовой линии. Замеры производили через каждые 0,5 м на отрезках ленты длиной 25 м в пятикратной повторности. Таким образом, суммарная длина реализации в каждом варианте составила 125 м, то есть 250 значений y_k . Для регистрации ординат y_k использовали нестандартное приспособление (рис. 3), позволяющее производить замеры с заданным шагом. Длина реализаций и шаг дискретизации выбраны на основании предварительных сведений об изучаемом предмете исследования⁵ [7; 17].



Р и с. 3. Снятие показаний в поле с помощью нестандартного приспособления

F i g. 3. Taking readings in the field using a non-standard device

Характеристика слоя стеблей в сформированных лентах представлена в таблице 1.

⁵ Стяжкин В. И. Исследование динамики навесного подборщика тресты ПТН-1 с целью улучшения показателей его рабочего процесса : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982.

Таблица 1

Table 1

Характеристика исходного материала
Characteristics of the source material

Показатель / Indicator	Значение / Meaning
Сорт льна / Flax variety	Лидер / Leader
Урожайность тресты, т/га / Yield trusts, t/ha	2,78
Густота стеблестоя, ст./м ² / Stem density, art./m ²	1 340
Балл полеглости стеблестоя / Stem lodging score	5,00
Растяннутость стеблей в ленте (относительная), % / Lengthiness of flax stems in the strip (relative), %	132
Средняя общая длина растений, см / Average total length of plants, cm	69,25
Влажность стеблей, %: / Humidity of the stems, %:	
– в ленте свежевытеребленных растений (вариант 1); / in the strip of freshly pulled out flax plants (option 1);	61,12
– в лентах при оборачивании (варианты 2, 3) / in the strips when turning (options 2, 3)	21,60

Обработку полученных числовых рядов производили методами математической статистики и корреляционно-спектрального анализа с помощью компьютерной программы STATGRAPHICS Plus 5.0 и табличного редактора Microsoft Excel. Вычисляли математические ожидания – m_y , средние квадратические отклонения – σ_y и коэффициенты вариации – V_y^6 . Для описания внутренней структуры изучаемых процессов в пространственной (по длине ленты) и частотной областях применяли корреляционно-спектральный анализ с построением графиков нормированных корреляционных функций – $\rho_y(\tau)$ и спектральных плотностей – $S_y(\omega)$. Далее анализировали в каждом варианте время спада корреляционной функции (интервал корреляции) t_0 и ширину полосы основных частот $\omega_{\text{ср}}$. Для оценки степени сохранения прямолинейности обернутых лент по отношению к базовому варианту использовали условный коэффициент, представляющий собой частное от деления интервалов корреляции:

$$\Phi_{1,n} = \frac{\tau_0^n}{\tau_0^1},$$

где τ_0^n – интервал корреляции, м; n – номер варианта расстила ленты стеблей подборщиком-оборачивателем ОКП-1,5К; τ_0^1 – интервал корреляции в базовом варианте 1, м.

Результаты исследования. Результаты проведенных исследований (табл. 2) показывают, что ленты стеблей в базовом варианте 1, сформированные льноуборочным комбайном, являются наиболее прямолинейными. Указанный факт обусловлен

⁶ Горлач Б. А. Теория вероятностей и математическая статистика : учебн. пособие для вузов. СПб. : Лань, 2021. 320. с. URL: <https://e.lanbook.com/book/168478> (дата обращения: 12.05.2024); Кулаицев А. П. Методы и средства комплексного статистического анализа данных : учебн. пособие / 5-е изд., перераб. и доп. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2022. 484 с. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1815604> (дата обращения: 29.05.2024).

стойкостью лент свежесобраных растений к влияниям ветровой нагрузки и колебаний машины из-за повышенной влажности и массивности стеблевого слоя.

Т а б л и ц а 2

Table 2

Основные числовые характеристики процессов изменения кривизны лент
The main numerical characteristics of the processes of changing the curvature of the tapes

Вариант / Option	$y_{\min}$, см / cm	$y_{\max}$, см / cm	m_y , см / cm	σ_y , см / cm	V_y , %
1	8,0	36,0	22,42	5,17	23,02
2	6,0	35,0	21,04	6,48	30,83
3	-3,5	40,5	21,64	7,88	36,39

Наибольшее расширение диапазона значений ординат y_k наблюдается у лент стеблей, обработанных подборщиком-оборачивателем ОКП-1,5К с отключенным прижимным устройством УПР (вариант 3). Об этом также свидетельствуют максимальные значения среднего квадратичного отклонения σ_y и коэффициента вариации V_y . Менее заметные изменения указанных параметров имеют ленты, обернутые и разостланные с применением усовершенствованного устройства (вариант 2).

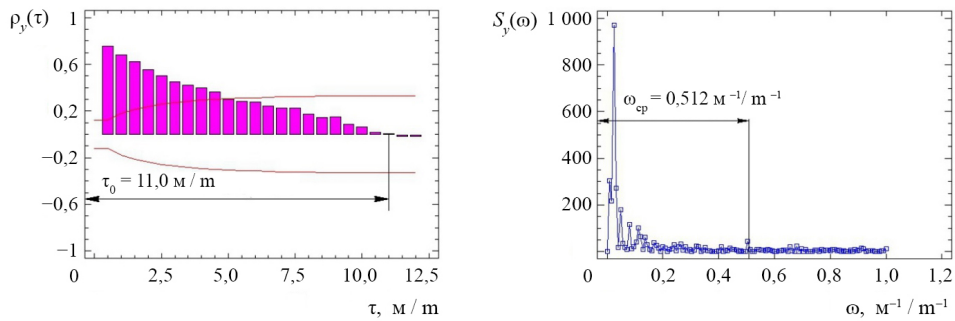
Результаты корреляционно-спектрального анализа представлены на рисунке 4 в виде графиков нормированных корреляционных функций $r_y(\tau)$ и спектральных плотностей $S_y(\omega)$ исследуемых процессов.

Анализ полученных графиков показал, что внутренняя структура процесса расположения ординат y_k комлевых частей лент стеблей также претерпела существенные изменения в результате работы УПР с отключенным прижимным устройством (рис. 4, вариант 3). Самый короткий интервал корреляции $\tau_0 = 5,0$ м свидетельствует о появлении в характере протекания указанного процесса резких и беспорядочных пульсаций ординат y_k , формирование которых обусловлено отсутствием надежного сопровождения ленты льна при движении по расстилочному щиту. При этом подсушенная стеблевая масса легко подвергалась воздействию ветра и колебаний машины, расширяя тем самым границы спектра частот указанных колебаний с $\omega_{cp} = 0,512$ в базовом варианте 1 до $\omega_{cp} = 0,712$ м⁻¹.

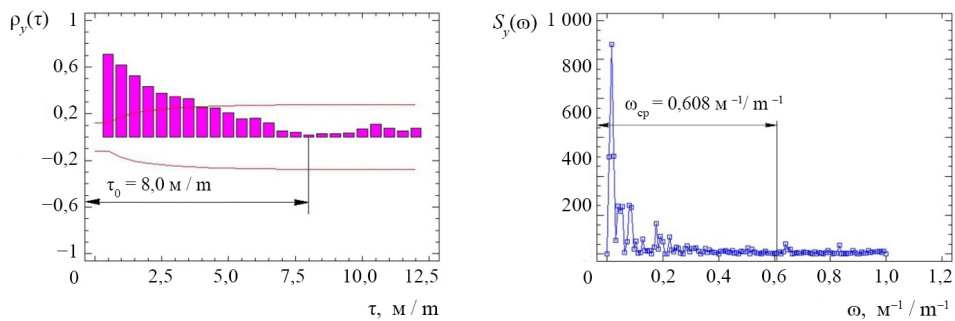
Однако прижим ленты льна к активной рабочей поверхности ремня УПР полностью устраняет отмеченные внешние воздействия на процесс расстила (рис. 4, вариант 2). В этом случае сокращение интервала корреляционной связи с $\tau_0 = 11,0$ (базовый вариант 1) до $\tau_0 = 8,0$ м произошло только за счет появления новых низкочастотных колебаний ординат y_k ($\omega_{cp} = 0,512 \dots 0,608$ м⁻¹), обусловленных траекторией движения льноподборщика.

В результате корреляционно-спектрального анализа установлено, что наибольшее сохранение прямолинейности выявлено у лент стеблей, разостланных с применением усовершенствованного УПР – $\phi_{1,2} = 0,73$ (73 %), а отключение прижимного устройства УПР вызвало сохранение указанного параметра всего лишь на уровне $\phi_{1,3} = 0,45$ (45 %).

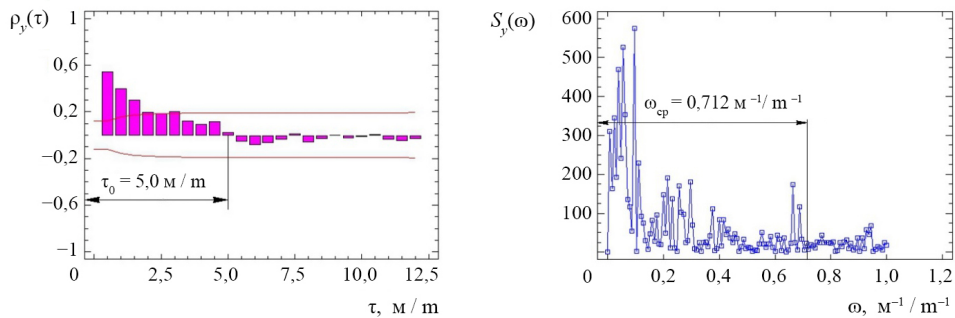
Вариант 1 / Variant 1



Вариант 2 / Variant 2



Вариант 3 / Variant 3

Р и с. 4. Графики нормированных корреляционных функций $r_y(\tau)$ и спектральных плотностей $S_y(\omega)$ исследуемых процессовF i g. 4. Graphs of normalized correlation functions $r_y(\tau)$ and spectral densities $S_y(\omega)$ of the studied processes

Таким образом, влияние нового прижимного устройства на сохранение прямолинейности ленты стеблей оценивается положительно, что обеспечивает повышение производительности льноподборщиков на 37,5 %, снижение

эксплуатационных затрат на 15,2 %, и себестоимости продукции на 10,7 %⁷ [9]. Поэтому для обеспечения более высокого уровня механизации уборочных процессов льноуборочные машины целесообразно оснастить усовершенствованными устройствами для принудительного расстила лент [19].

Обсуждение и заключение. Основной причиной нарушения прямолинейности лент льна является наличие в льноуборочных машинах пассивных расстилочных устройств, поэтому при организации уборки следует применять технические средства, производящие расстил с активным сопровождением ленты максимально близко к поверхности поля. Для реализации указанного требования разработано устройство для принудительного расстила ленты растений, рабочее пространство которого образовано активной боковой кромкой плоского ремня и прижимным устройством в виде прутков, шарнирно закрепленных друг за другом с возможностью подъема своей прижимной поверхности под воздействием перемещаемого слоя растений льна.

Для оценки эффективности нового технического решения предлагаемое прижимное устройство смонтировано на подборщик-оборачиватель ОКП-1,5К. Результаты экспериментальных исследований показывают, что отключение прижимного УПР вызвало неудовлетворительное сохранение прямолинейности обернутых лент всего лишь на уровне $\omega_{1,3} = 0,45$ с существенным расширением полосы основных частот с $\omega_{cp} = 0,512$ до $\omega_{cp} = 0,712$ м⁻¹ за счет появления в указанном спектре новых случайных колебаний. Наибольшее сохранение прямолинейности выявлено у лент льна, разостланных с применением усовершенствованного УПР, – $\phi_{1,2} = 0,73$, поэтому влияние нового прижимного устройства на сохранение прямолинейности ленты льна оценивается положительно. Данное устройство может обеспечить повышение производительности льноподборщиков, пропорциональное снижению эксплуатационных затрат на единицу наработки и уменьшить себестоимость продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кадетова Н.А., Середа Н.А. Совершенствование программно-целевого планирования развития сельских территорий. *Экономика сельского хозяйства России*. 2024;(5):104–113. <https://doi.org/10.32651/245-104>
Kadetova N.A., Sereida N.A. Improving Program-Target Planning for Rural Territories Development. *Economics of Agriculture of Russia*. 2024;(5):104–113. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32651/245-104>
2. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ущачовский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обеспечения льноводства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020;14(3):45–52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The Main Problems of Scientific Support of Flax Growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):45–52. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>

⁷ Зинцов А. Н., Смирнов Н. А., Соколов В. Н. Результаты полевых испытаний принудительного расстила ленты в машинах костромского комплекса для раздельной уборки льна // Высокоэффективные технологии производства и переработки льна : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 2002. С. 226–231.

3. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Исследование технологий уборки льна льноуборочными машинами. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(1):19–24. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24>
Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. Flax Harvesting Technologies for Flax Harvesting Machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):19–24. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24>
4. Сизов И.В., Пак Л.Н., Белякова Е.С. Оценка качества тресты при раздельной технологии уборки льна-долгунца. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(2):49–54. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-49-54>
Sizov I.V., Pak L.N., Belyakova E.S. Evaluation of Straw Flax Preparation Quality in the Framework of Separate Flax Harvesting Technology. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(2):49–54. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-49-54>
5. Перов М.Г. Анализ состояния и пути повышения качества льнотресты. *Наука в центральной России*. 2022;58(4):53–61. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
Perov M.G. Analysis of the State and Ways to Improve the Quality of Flax. *Science in the Central Russia*. 2022;58(4):53–61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
6. Соловьев С.В., Романенко В.Ю., Черников В.Г. Разработка самоходного оборачивателя лент льна на дистанционном управлении. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024;18(4):10–16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-4-10-16>
Solovyov S.V., Romanenko V.Yu., Chernikov V.G. Development of Remote-Controlled Self-Propelled Flax Windrow Turner. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(4):10–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-4-10-16>
7. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А., Перов М.Г., Добрецов В.А. Влияние процессов вспушивания ленты стеблей льна на структурные параметры слоя. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(4):542–557. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>
Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A., Perov M.G., Dobretsov V.A. Influence of the Processes of Fluffing the Flax Stem Strips on the Structural Parameters of the Layer. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):542–557. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>
8. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Вероятностная модель кинематики устройства для уменьшения растянутости стеблей льна-долгунца в ленте. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(1):126–144. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.126-144>
Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Probabilistic Model of the Kinematics of the Device for Reducing Elongation of Flax Fiber Stems in the Tape. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):126–144. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.126-144>
9. Ростовцев Р.А., Ковалев М.М., Перов Г.А., Просолов С.В. Исследование инновационного процесса теребления стеблей в аппаратах с поперечными ручьями. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(3):355–372. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.355-372>
Rostovtsev R.A., Kovalev M.M., Perov G.A., Prosolov S.V. Studying the Innovative Flax Pulling Process in Apparatuses with Transverse Pulling Channels. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):355–372. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.355-372>
10. Зинцов А.Н., Билан М.М., Добрецов В.А. Исследование и профилактика дефектов лент льна-долгунца. *Аграрный вестник Нечерноземья*. 2022;(3):56–63. https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_03_56
Zintsov A.N., Bilan M.M., Dobretsov V.A. Investigation and Prevention of Defects in Flax Tapes Annotation. *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem Region*. 2022;(3):56–63. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_03_56
11. Быков Н.Н., Калугин В.М., Ковалев М.М., Перов Г.А., Соснов В.И. Устройство для оборачивания и расстила лент льна. Патент 1271428 СССР. 23 ноября 1986. URL: <https://clck.ru/3MEKoa> (дата обращения: 29.10.2024).

- Bykov N.N., Kalugin V.M., Kovalev M.M., Perov G.A., Sosnov V.I. [A Device for Wrapping and Spreading Flax Ribbons]. Patent 1271428 USSR. 1986 November 23. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3MEKoa> (accessed 29.10.2024).
12. Зубанов В.В., Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Смирнов Н.А., Соколов В.Н. Устройство для принудительного расстила ленты к льноуборочным машинам. Патент 2193301 Российская Федерация. 27 ноября 2002. <https://patenton.ru/patent/RU2193301C2>
Zubanan V.V., Zintsov A.N., Kovalev M.M., Smirnov N.A., Sokolov V.N. [Device for Forced Spreading of the Ribbon to Flax-Harvesting Machines]. Patent 2193301 Russian Federation. 2002 November 27. (In Russ.) <https://patenton.ru/patent/RU2193301C2>
13. Смирнов Н.А., Зинцов А.Н., Соколов В.Н. Устройство для перемещения ленты растений. Патент 2221361 Российская Федерация. 20 января 2004. <https://elibrary.ru/zoconn>
Smirnov N.A., Zintsov A.N., Sokolov V.N. Apparatus for Transportation of Plant Tape. Patent 2221361 Russian Federation. 2004 January 20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/zoconn>
14. Ростовцев Р.А., Зинцов А.Н. Исследование процесса принудительного расстила ленты льнокомбайном. *Достижения науки и техники АПК*. 2006;(4):22–25. <https://elibrary.ru/keztjh>
Rostovtsev R.A., Zintsov A.N. [Investigation of the Process of Forced Spreading of a Ribbon by a Flax Combine]. *Achievements of Science and Technology of AICis*. 2006;(4):22–25. (In Russ.) <https://elibrary.ru/keztjh>
15. Перов Г.А., Ростовцев А.А. Определение параметров ручья транспортера расстилочного устройства льноуборочной машины. *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2011;(5):74–76. <https://elibrary.ru/ogawbl>
Perov G.A., Rostovtsev A.A. [Determination of the Parameters of the Stream Conveyor of the Flax Harvester Device]. *Vestnik of the Russian Agricultural Sciences*. 2011;(5):74–76. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ogawbl>
16. Черников В.Г., Перов Г.А., Попов Р.А., Ростовцев А.А. Исследование процесса перемещения стеблей льна по расстилочному щиту в экстремальных погодных условиях. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2012;(3):27–28. <https://elibrary.ru/oxupur>
Chernikov V.G., Perov G.A., Popov R.A., Rostovtsev A.A. [Investigation of the Process of Moving Flax Stalks Along a Spreading Shield in Extreme Weather Conditions]. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2012;(3):27–28. (In Russ.) <https://elibrary.ru/oxupur>
17. Лобачев А.А., Трофимов М.А., Смирнов С.В., Соколов В.Н. Определение ошибок копирования двоянного вала подбирающим аппаратом пресс-подборщика. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2023;(3):129–136. <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2023-44-3-129-136>
Lobachev A.A., Trofimov M.A., Smirnov S.V., Sokolov V.N. [Determination of Errors in Copying a Double Roll by a Pick-Up Baler. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga Region*. 2023;(3):129–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2023-44-3-129-136>
18. Зубанов В.В., Ковалев М.М., Перов Г.А., Сизов И.В. Оборачивающее устройство с прижимными прутками консольного типа. Патент 107891 Российская Федерация. 10 сентября 2011. <https://elibrary.ru/ogvvns>
Zubanan V.V., Kovalev M.M., Perov G.A., Sizov I.V. [Wrapping Device with Cantilever Type Clamping Rods]. Patent 107891 Russian Federation. 2011 September 10. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ogvvns>
19. Зинцов А.Н. Расстилочное устройство к льноуборочным машинам. Патент 2834953 Российская Федерация. 19 февраля 2025. <https://elibrary.ru/gsxima>
Zintsov A.N. Spreading Device for Flax Harvesting Machines. Patent 2834953 Russian Federation. 2025 February 19. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/gsxima>

Об авторах:

Зинцов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей Костромской государственной сельскохозяйственной академии (156530, Российская Федерация, п. Караваево, ул. Учебный городок, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>, Researcher ID: [ADY-1834-2022](https://orcid.org/ADY-1834-2022), zintsov_a@mail.ru

Ковалев Михаил Михайлович, доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>, Researcher ID: AAT-4775-2021, m.kovalev@fnclrk.ru

Перов Геннадий Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>, Researcher ID: AAB-5326-2022, g.perov@fnclrk.ru

Вклад авторов:

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

М. М. Ковалев – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач.

Г. А. Перов – 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 28.12.2024; поступила после рецензирования 20.01.2025;
принята к публикации 28.01.2025*

About the authors:

Alexandr N. Zintsov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Tractors and Automobiles, Kostroma State Agricultural Academy (34 Uchebny Gorodok St., Karavaevo 156530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>, Researcher ID: ADY-1834-2022, zintsov_a@mail.ru

Mikhail M. Kovalev, Dr.Sci. (Eng.), Chief Researcher, Federal Research Center for Bast Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>, Researcher ID: AAT-4775-2021, m.kovalev@fnclrk.ru

Gennady A. Perov, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher, Federal Research Center for Bast Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>, Researcher ID: AAB-5326-2022, g.perov@fnclrk.ru

Authors contribution:

A. N. Zintsov – conducting the study including carrying out experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and obtained data.

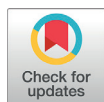
M. M. Kovalev – controlling, leading and mentoring the process of planning and conducting the study; formulating the study idea, aims and objectives.

G. A. Perov – conducting the study, including carrying out experiments and collecting data; preparing the manuscript including critical review, commentary and revision at pre- or post-publication stages.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 28.12.2024; revised 20.01.2025; accepted 28.01.2025

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.298-317>

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

УДК 631.31

Оригинальная статья / Original article

Результаты исследования экспериментального образца рабочего органа глубокорыхлителя на переуплотненной почве

Г. Г. Пархоменко¹, И. В. Божко¹✉,
С. И. Камбулов^{1,2}, Н. В. Бужинский¹

¹ Аграрный научный центр «Донской»,
г. Зерноград, Российская Федерация

² Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ i.v.bozhko@mail.ru

Аннотация

Введение. Одной из наиболее значимых проблем для науки и техники в современных условиях является возрастание антропогенных нагрузок на почву, оказываемых сельскохозяйственной техникой, что приводит к ее уплотнению. Переуплотнение возникает при недостатке органического вещества и влаги. В зоне недостаточного увлажнения процессы минерализации гумуса превалируют над его образованием, поэтому переуплотнение приводит к увеличению объемной массы почвы (плотности почвы). Один из путей решения этой проблемы состоит в использовании безотвальных глубокорыхлителей.

Цель исследования. Синтез элементарно-агрегатных компонентов рабочего органа глубокорыхлителя для качественной обработки почвы.

Материалы и методы. Определение показателей технологического процесса экспериментального образца рабочего органа для глубокой обработки почвы осуществлялось с применением стандартных и оригинальных методов исследований показателей качества рыхления пласта.

Результаты исследования. Определили, что при наличии прутков в конструкции рабочего органа по показателю глыбистости глыбы сосредоточены в основном в верхнем горизонте обработанного пласта (0...10 см), а при их отсутствии – в нижних горизонтах (20...30 и 30...40 см). Порозность почвы как функция плотности не достигает оптимальных значений (свыше 50 %) в нижних слоях (37 и 32...33 % на 20...30 см; 31 и 34...35 % на 30...40 см для фонов дискованная стерня зерновых и черный пар соответственно).

Обсуждение и заключение. Установлена целесообразность оснащения конструкции рабочего органа глубокорыхлителя криволинейными прутками. Определили, что лапы в конструкции рабочего органа необходимо устанавливать не под прямым углом к стойке в поперечном направлении, а под углом скола почвы, тем самым плоскостной трансформируется в чизель с расширителями щели для улучшения качества

© Пархоменко Г. Г., Божко И. В., Камбулов С. И., Бужинский Н. В., 2025



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

обработки и снижения энергозатрат. Совершенствование конструкции рабочего органа глубокорыхлителя также возможно за счет увеличения угла установки плоскорезной лапы ко дну борозды.

Ключевые слова: глубокорыхлитель, рабочий орган, элементарно-агрегатные компоненты, показатели качества обработки почвы

Благодарности: авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

Финансирование: работа выполнена в рамках Государственного задания № 0505-2022-0006 «Разработать методологию ресурсосбережения при формировании машинных технологий на основе новых машин и рабочих органов для возделывания и уборки основных сельскохозяйственных культур в условиях недостаточного и неустойчивого увлажнения».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пархоменко Г.Г., Божко И.В., Камбулов С.И., Бужинский Н.В. Результаты исследования экспериментального образца рабочего органа глубокорыхлителя на переуплотненной почве. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):298–317. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.298-317>

Results of the Study of Using the Experimental Sample of the Deep Ripper Tool on Overconsolidated Soil

G. G. Parkhomenko^a, I. V. Bozhko^a✉,

S. I. Kambulov^{a,b}, N. V. Buzhinsky^a

^a Agricultural Research Center “Donskoy”,
Zernograd, Russian Federation

^b Don State Technical University,
Rostov on Don, Russian Federation

✉ i.v.bozhko@mail.ru

Abstract

Introduction. Under modern conditions, a serious problem for science and technology is increasing anthropogenic loads on the soil caused by agricultural machinery that leads to the soil consolidation. Soil overconsolidation occurs when there is a lack of organic matter and moisture. In the zone of insufficient moisture, the humus mineralization processes prevail over its formation process, so overconsolidation leads to an increase in the soil volume weight (soil density). One way to solve this problem is to use boardless deep rippers.

Aim of the Study. The aim of the study is to synthesize element and aggregate components of the deep ripper tool for high-quality soil cultivation.

Materials and Methods. Identifying the indicators of the technological process of the experimental sample of the tool for deep soil cultivation was carried out using standard and original methods of studying the soil breaking up quality indicators.

Results. The study has shown that with rods in the design of the tool, in terms of lumpiness, the lumps are concentrated mainly in the upper layer of the tilled layer (0...10 cm), and if there are no rods in the tool – in the lower layers (20...30 and 30–40 cm). Soil porosity as a function of density does not reach optimal values (over 50%) in the lower soil layers (37 and 32...33% at 20...30 cm; 31 and 34...35% at 30...40 cm for the backgrounds of disked stubble of cereals and autumn fallow, respectively).

Discussion and Conclusions. As a result of the study, it has been found realistic to equip the deep ripper tool with curved rods. It has been determined that the sweeps in the design of the tool must be installed not at a right angle to the rack in the transverse direction,

but at an angle of soil chipping therefore land clearer is transformed into a chisel with gap expanders to improve the quality of cultivation and reduce energy costs. Improving the design of a deep ripper tool is also possible by increasing the angle of installation of the sweep to the furrow pan.

Keywords: deep ripper, tool, elemental and aggregate components, soil tillage quality indicators

Acknowledgements: The authors would like to thank anonymous reviewers.

Funding: The work was carried out within the framework of State Assignment No. 0505-2022-0006 “Develop a methodology for resource conservation in the formation of machine technologies based on new machines and working bodies for the cultivation and harvesting of basic agricultural crops in conditions of insufficient and unstable moisture”.

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

For citation: Parkhomenko G.G., Bozhko I.V., Kambulov S.I., Buzhinsky N.V. Results of the Study of Using the Experimental Sample of the Deep Ripper Tool on Overconsolidated Soil. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):298–317. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.298-317>

Введение. Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145¹, в современных условиях ключевым фактором экономики является разработка наукоемкой продукции на собственной технологической основе. При этом возрастание антропогенных нагрузок на почву, масштаб которых приводит к ее деградации, обусловленной переуплотнением, является одной из наиболее значимых проблем для науки и техники.

Деградация характеризуется изменением свойств почвы в результате избыточных нагрузок при всех видах землепользования, разрушающих почвенный покров, ухудшающих его физическое состояние и агротехнические показатели процесса. При этом наблюдается ухудшение водно-воздушного режима, условий существования почвенной биоты, что является основанием для усиления эрозийных процессов.

Одной из причин переуплотнения почвы является постоянное применение отвальной обработки почвы на одну и ту же глубину [1]. Переуплотнение почвы при отвальной обработке способствует уменьшению пористости и влагопроницаемости. Чрезмерное уплотнение пласта приводит к ускоренной аридности пахотного слоя, что в свою очередь в условиях недостаточного увлажнения ведет к иссушительной деградации почвы. Переуплотнение возникает при недостатке органического вещества и влаги. В зоне недостаточного увлажнения процессы минерализации гумуса преобладают над его образованием, поэтому переуплотнение приводит к увеличению объемной массы почвы (плотности почвы). Слой почвы, расположенный ниже вспаханного отвальным плугом, имеет более плотное сложение и распыленность почвенной массы.

На переуплотненных почвах возникает необходимость глубокого рыхления почвы на большую глубину, чем глубина пахотного слоя. При этом увеличение

¹ Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. №145 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50358> (дата обращения: 29.10.2024).

глубины обработки почвы приведет к повышению энергозатрат. Решение этой проблемы состоит в использовании безотвальных глубокорыхлителей [2].

Целью данного этапа исследований является синтез элементарно-агрегатных компонентов рабочего органа глубокорыхлителя для качественной обработки почвы.

Обзор литературы. Одним из критериев энергоэффективности является наименьшее тяговое сопротивление рабочего органа глубокорыхлителя [3]. Глубокое рыхление относится к наиболее энергоемким технологическим операциям [4], что связано с конструктивными особенностями рабочих органов для глубокого рыхления, в задачи которых входит качественное крошение чрезмерно уплотненного слоя почвы. Рабочие органы при этом подвергаются высокому сопротивлению почвы, что является следствием роста их тягового сопротивления. Необходимо обоснование конструкции в части снижения тягового сопротивления рабочих органов глубокорыхлителя.

При безотвальном рыхлении энергозатраты меньше на 30 %, чем при отвальной обработке почвы [5]. Поэтому почвоуглубление с разуплотнением необходимо осуществлять безотвальными рабочими органами.

По мнению исследователей [6], снижение тягового сопротивления возможно за счет обеспечения роста интенсивности деформации пласта почвы при его обработке, обусловленного особенностями конструкции рабочего органа. Интенсивность деформаций пласта повышается от заданного колебательного процесса элементов рабочего органа при его взаимодействии с переуплотненной почвой.

В работе [7] установлено, что при использовании вибрационного рабочего органа глубокорыхлителя тяговое сопротивление уменьшается на 21 %. Затраты энергии на крошение пласта почвы зависят от конфигурации режущей кромки рабочего органа.

Авторами [8; 9] отмечается высокая энергоэффективность рабочих органов криволинейной формы по критерию минимума тягового сопротивления по сравнению с прямолинейным. При этом, согласно заключению ученых [10], вариативность кривизны рабочего органа позволяет обрабатывать почву различной твердости с требуемыми энергетическими показателями процесса.

Классическим рабочим органом для глубокой безотвальной обработки почвы является плоскорезная лапа с долотом. Необходимо взять за основу классический рабочий орган и произвести его усовершенствование конструкции. В качестве основного рабочего органа для глубокого рыхления авторы [11] предлагают использовать плоскорезные лапы с углом раствора 120° . Ученые также выделяют ряд недостатков, которые имеют плоскорезные лапы.

По результатам исследования [12], оснащение рабочего органа глубокорыхлителя крыльями в виде плоскорезов приводит к заметному повышению тягового сопротивления. Также, используемые в качестве рабочих органов глубокорыхлителя плоскорезные лапы, согласно работе [13], характеризуются недостаточно высоким качеством работы, в частности, наличием глыб в обработанном пласте почвы. При этом авторами [14; 15] установлено, что увеличение процесса образования глыб наблюдается на сухих почвах. Другим недостатком качества процесса обработки сухой суглинистой почвы является увеличение плотности и образование уплотненной зоны в нижних горизонтах пласта [16].

В исследовании [17] установлено, что наличие уплотненных зон в нижних горизонтах обрабатываемого пласта приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Таким образом, необходимо разуплотнение этих горизонтов пласта путем применения глубокорыхлителей [18]. Глубокорыхлители при этом должны качественно разуплотнять плужную подошву.

Разуплотнение нижних горизонтов пласта (плужной подошвы) является одним из основных условий плодородия почвы [19]. Из анализа результатов исследования, выполненного авторами [20], следует, что плужная подошва может залегать на глубине от 10 до 40 см. В материалах другого исследования [21] приведена средняя глубина плужной подошвы 35 см при плотности до $2,58 \text{ г/см}^3$. Исследование механизмов образования плужной подошвы позволило авторам [22] сделать вывод о наличии глыбистой структуры почвы ниже горизонта уплотненной зоны, состоящей из мелкодисперсной пылевидной фракции.

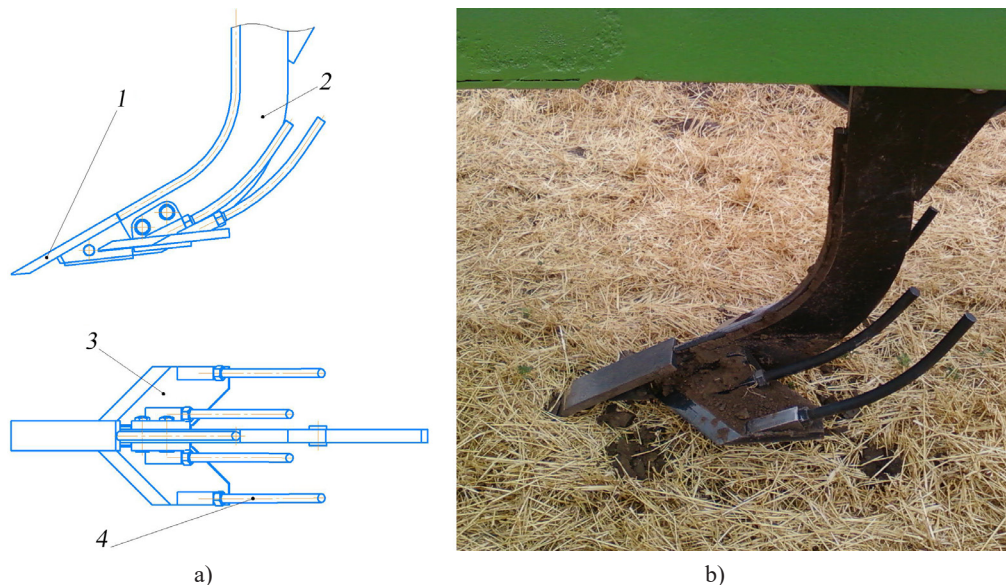
Образование плужной подошвы свидетельствует о деградации почвы [23]. При этом наглядными признаками деградации почвы в данном случае являются переуплотнение пласта, снижение пористости и повышение глыбистости с распылением верхнего слоя [24]. Распыление почвы приводит к часто встречающемуся типу деградации почвы – ветровой эрозии [25; 26], одной из профилактических мер предотвращения которой является создание мульчирующего слоя на поверхности поля дополнительными ротационными рабочими органами с пассивным приводом.

Мульчирующая поверхность на поле создается из измельченных и уплотненных пожнивных и иных растительных остатков, перемешанных с верхним мелкокомковатым слоем почвы. Наличие мульчирующего слоя на поверхности поля является одним из исходных требований к глубокой безотвальной обработке почвы [27].

В исследовании [28] установлено, что наличие мульчирующего слоя на поверхности поля, состоящего из измельченных растительных остатков и раскрошенной почвы, способствует сохранению влаги внутри пласта и повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Рабочие органы для создания мульчирующего слоя должны обеспечивать высокую степень крошения глыб на поверхности поля.

Материалы и методы. За основу разрабатываемой конструкции глубокорыхлителя была взята конструкция чизеля в виде стойки с долотом. Однако нижний слой пласта часто характеризуется чрезмерной уплотненностью. В результате взаимодействия с долотом глубокорыхлителя нижний слой скалывается в виде крупных фрагментов (глыб), которые необходимо подвергать дополнительному измельчению. Глыбы необходимо извлечь в верхние слои пласта и на поверхность поля для взаимодействия с дополнительными рабочими органами приспособления с целью улучшения крошения и выравнивания, функционирующего на глубине до 8–10 см. Таким образом, необходимо оснастить долото глубокорыхлителя элементами для извлечения глыб изнутри пласта на поверхность поля ради последующего измельчения. В качестве элементов для извлечения глыб изнутри пласта на поверхность поля с целью последующего измельчения конструкция экспериментального рабочего органа глубокорыхлителя оснащена прутками.

Экспериментальный образец рабочего органа глубокорыхлителя (рис. 1) состоит из долота 1, закрепленного на стойке 2, соединенного с плоскорезными лапами 3, задняя торцевая часть которых продолжена прутками 4, установленными на расстоянии друг от друга в горизонтальной плоскости.



Р и с. 1. Рабочий орган глубокорыхлителя:
 а) схема рабочего органа глубокорыхлителя:
 1 – долото; 2 – стойка; 3 – плоскорезная лапа; 4 – прутки;
 б) общий вид рабочего органа глубокорыхлителя

F i g. 1. The deep ripper tool:
 а) diagram of the deep ripper tool:
 1 – chisel; 2 – stand; 3 – sweep; 4 – rods;
 б) general view of the deep ripper tool

Источник: а) схема составлена авторами статьи; б) фотография сделана Г. Г. Пархоменко при полевом испытании в 2024 г.

Source: а) the diagram was drawn up by the authors of the article; б) the photo was taken during field testing by G. G. Parkhomenko in 2024.

Рабочий орган имеет конструктивную ширину захвата в сборе 380 мм (без прутков – 320 мм), угол крошения долота составляет 30°, угол раствора плоскорезной лапы – 90°, высота прутка – 40 см.

Прутки выполнены по форме циклоиды с параметром t° , образуемой наименьшей длиной траектории глыбы при перемещении со дна борозды, обработанной на глубину a м, на поверхность почвы:

$$l_{\text{прутка}} = 2a \cdot \left| \sin \frac{t}{2} \right|, 0 \leq t \leq \pi.$$

Определение показателей технологического процесса рабочего органа глубокорыхлителя осуществлялось по стандартным и оригинальным методикам.

Стандартные методики устанавливались на основании ГОСТ 20915-2011², ГОСТ 24055-2016³, ГОСТ 5180-2015⁴, ГОСТ 33736-2016⁵. Оригинальной является методика определения глыбистости, заключающаяся в разборе фракций почвы вручную и послойного учета глыб размером более 100 мм по горизонтам с помощью палетки. Палетка размером 0,5×0,5 м² выполнена из металлической сетки с ячейками в виде квадрата со стороной 5 см.

Плотность почвы определяют в тех же местах, где отбирают пробы буром на влажность. Для определения данного показателя внутри пласта верхний горизонт снимается осторожным раскапыванием, бур заглубляется в дно полученного приямка как в поверхностный слой почвы. Полученные пробы почвы плотно упаковываются для определения в лабораторных условиях влажности W и массы $m_{\text{вл.п.}}$.

Объем V почвы с ненарушенным сложением определяют по формуле:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h,$$

где D , h – диаметр, высота бура соответственно, см.

Плотность γ почвы определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{m_{\text{вл.п.}} \cdot 100}{(100 + W) \cdot V},$$

где $m_{\text{вл.п.}}$ – масса влажной почвы, г. Зная плотность γ г/см³ почвы, можно определить ее порозность (ПОР, %) по формуле:

$$\text{ПОР} = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_{\text{тв.ф.}}} \right) \cdot 100,$$

где $\gamma_{\text{тв.ф.}}$ – плотность твердой фазы почвы $\gamma_{\text{тв.ф.}} = 2,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Для получения показателей тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом при различных режимах функционирования, использовались измерительная тезометрическая система ZET 058 производства Зеленоградской электро-технической лаборатории ZETLAB с подключением тензодатчика ТЕНЗО-М С2Н-2-С3, монтируемого на экспериментальной установке, и персональный компьютер.

Результаты исследования. Исследования проводились по следующим фонам: стерня без обработки (С), дискованная стерня (ДС), черный пар (ЧП). Фон ДС располагался на том же поле, что и С, после дискования в один след и выпадения осадков. Исследования по фонам ДС и ЧП проводились одновременно (в течение одного дня).

² ГОСТ 20915-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094197> (дата обращения: 28.10.2024).

³ ГОСТ 24055-2016. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144754> (дата обращения: 28.10.2024).

⁴ ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200126371> (дата обращения: 28.10.2024).

⁵ ГОСТ 33736-2016. Техника сельскохозяйственная. Машины для глубокой обработки почвы [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144758> (дата обращения: 28.10.2024).

Влажность почвы соответствовала норме (до 30 %) и составила по фонам С, ДС и ЧП 7,35–15,83 %, 12,90–14,15 % и 14,65–20,10 % соответственно. Следует отметить большую степень промачивания почвы по фону ЧП после выпадения осадков, при этом на поверхности поля наблюдались следы водной эрозии. Также заметна пересушенность верхних горизонтов почвы по фону С, который исследовался до выпадения осадков.

Твердость почвы до обработки представлена в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Твердость почвы до обработки по фонам и горизонтам, МПа**Soil hardness before processing by background and layers, МПа**

Фон / Background	10 см / cm	20 см / cm	30 см / cm	40 см / cm
Стерня без обработки / Stubble without processing	2,174	2,946	3,968	4,416
	2,330	2,882	3,951	4,458
	2,431	2,963	3,978	4,521
Среднее / Average	2,312	2,930	3,966	4,465
Дискованная стерня / Disked stubble	2,001	3,830	4,051	4,989
	2,208	3,547	5,175	4,968
	2,036	3,760	5,072	4,760
Среднее / Average	2,082	3,712	4,766	4,906
Черный пар / Autumn fallow	1,414	1,208	1,518	1,622
	1,276	1,518	1,760	1,794
	1,414	1,760	1,587	1,898
Среднее / Average	1,368	1,495	1,622	1,771

По анализу твердости почвы до обработки следует отметить соответствие норме (до 4 МПа) по всем фонам на глубине 10 и 20 см (в среднем 1,368–3,712 МПа), по С также на 30 см (3,966 МПа), по ЧП на 30 см (в среднем 1,622 МПа) и на 40 см (в среднем 1,771 МПа). По фону С на глубине 40 см твердость также близка к требуемой, с незначительным ее превышением (в среднем 4,465 МПа). По фону ДС в горизонтах 30 см (в среднем 4,766 МПа) и 40 см (в среднем 4,906 МПа) твердость почвы превышает норму (до 4 МПа), что обусловлено воздействием на пласт дисковых рабочих органов, поскольку на необработанной стерне (С) этого не наблюдалось.

Помимо анализа твердости и влажности почвы, характеристиками условий проведения исследования показателей технологического процесса, выполняемого рабочим органом глубокорыхлителя (СТО АИСТ 4.6-2018), отмечены ровный рельеф обрабатываемых полей (уклон не более 8°) с микрорельефом продольным 2 см, поперечным 3 см и высотой растительных и пожнивных остатков менее 25 см.

Плотность почвы не входит в перечень обязательных агротехнических показателей для определения качества работы глубокорыхлителей, поэтому определялась только для фонов ДС и ЧП, сравнение которых адекватно ввиду одновременного получения данных. По указанным фонам плотность почвы до обработки составила 1,37–1,61 г/см³ (ДС) и 1,25–1,66 г/см³ (ЧП). Полученные данные свидетельствуют о сильно уплотненном пласте, требующем разрыхления.

Перемещение почвы внутри пласта после прохода рабочего органа можно проследить по изменению абсолютной влажности. Абсолютная влажность почвы до обработки на фоне С свидетельствует о пересушенности пласта в верхних горизонтах (0–10 и 10–20 см): 7,35–8,35 %. Нижний горизонт на глубине до 30 см характеризовался незначительной увлажненностью: 15,30–15,85 %.

После прохода глубокорыхлителя с прутками на глубину 30 см на фоне С внутри пласта установилась абсолютная влажность, совпадающая с нижним горизонтом необработанной почвы (15,30–15,70 %), что свидетельствует о перемещении слоев в процессе рыхления (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Абсолютная влажность почвы стерни без обработки
Absolute soil moisture (background stubble without processing)

Обработка / Processing	Значение / Value			
	Фактическое / Actual		Допуск / Admission	
До обработки в горизонте, см: / Before processing in the layer, cm:				
0–10	7,35	7,85	8,35	
10–20	8,25	8,25	7,45	
20–30	15,85	15,80	15,30	До 30 % / To 30%
После прохода глубокорыхлителя с прутками в горизонте 0–30 см / After the passage of the deep ripper with rods in the layer 0–30 cm	15,30	15,70	15,40	

В связи с вышеизложенным на обработанном фоне (ДС) принято решение более детального исследования влажности после прохода глубокорыхлителя с прутками (глубина 40 см) с определением плотности и порозности, а также сравнения полученных данных с результатами по черному пару.

Анализ результатов (фон ДС) также свидетельствует о перемещении влажных слоев почвы в верхние горизонты после прохода глубокорыхлителя: влажность почвы с 13,20–13,25 % увеличилась до 16,80–17,40 % на глубине 0–10 см и с 12,90–13,85 % до 15,25–15,90 % на 10–20 см. Влажность в нижних горизонтах пласта остается постоянной: 14,0 % до – 14,40 после на 20–30 см и 14,10 % до – 14,98 % после на 30–40 см в среднем.

При этом долото глубокорыхлителя скалывает комки почвы из горизонта ниже заданной глубины обработки (40 см) и выносит их в поверхностные слои. Этим объясняется превышение влажности почвы после обработки (табл. 3).

Негативной стороной данного процесса является высокая вероятность испарения влаги с поверхностных слоев почвы, сохранность которой обеспечивалась внутри пласта. С другой стороны влага становится доступной, а извлечь ее из уплотненного комка, расположенного ниже 40 см, посредством гидротропизма корневой системы невозможно.

Непроизводительный расход влаги с поверхности поля пресекается посредством создания мульчирующего слоя ротационными рабочими органами, расположенными непосредственно за стойкой основных, для дополнительной обработки.

Таблица 3

Table 3

Абсолютная влажность почвы (фон дискованная стерня)**Absolute soil moisture (background disked stubble)**

Обработка / Processing	Горизонт, см / Layer, cm	Фактическое значение / Actual value			Среднее / Average	Допуск / Admission
До обработки / Before processing	0–10	13,20	13,25	13,30	13,25	До 30 % / To 30%
	10–20	13,85	12,90	13,70	13,48	
	20–30	14,00	14,00	14,00	14,00	
	30–40	14,15	14,10	14,05	14,10	
После обработки / After processing	0–10	17,40	16,80	17,20	17,13	
	10–20	15,35	15,90	15,25	15,50	
	20–30	13,35	14,90	14,95	14,40	
	30–40	15,10	15,10	14,75	14,98	

По фону ЧП наблюдается аналогичная картина (табл. 4): влажность почвы в горизонтах 20–30 и 30–40 см остается практически неизменной после обработки (с 19,43 до 19,98 % и с 19,70 до 19,02 % в среднем соответственно), а в горизонтах 0–10 и 10–20 см повышается за счет извлечения комков на поверхность (с 14,93 до 20,47 % и с 18,13 до 20,03 % в среднем соответственно).

Таблица 4

Table 4

Абсолютная влажность почвы (фон черный пар)**Absolute soil moisture (background autumn fallow)**

Обработка / Processing	Горизонт, см / Layer, cm	Фактическое значение / Actual value			Среднее / Average	Допуск / Admission
До обработки / Before processing	0–10	14,65	14,75	15,40	14,93	До 30 % / To 30%
	10–20	18,05	18,10	18,25	18,13	
	20–30	19,45	19,55	19,30	19,43	
	30–40	20,10	19,15	19,85	19,70	
После обработки / After processing	0–10	20,35	20,05	21,0	20,47	
	10–20	20,55	19,85	19,70	20,03	
	20–30	19,50	20,30	20,15	19,98	
	30–40	18,70	19,70	18,65	19,02	

Следует отметить большой запас влаги в подпахотном уплотненном горизонте почвы на фоне ЧП по сравнению с ДС.

Перемещение глыб на поверхность поля, образуемых при взаимодействии рабочего органа с плужной подошвой, расположенной на глубине не менее 20 см, осуществляется с помощью прутков. Это подтверждается сравнением распределения глыб по горизонтам после прохода глубокорыхлителя без прутков и с прутками (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Глыбистость по горизонтам глубокорыхлителя

Lumpiness by layers for a deep ripper

Фон / Background	Горизонт почвы, см / Soil layer, cm	Глыбистость: количество комков крупнее 100 мм, шт./м ² глубокорыхлителя с прутками/без прутков при скорости, м/с и глубине, см / Lumpiness: number of lumps larger than 100 mm, pcs/m ² of subsoiler with rods/ without rods at speed, m/s and depth, cm								
		1,81			2,37			2,93		
		30	35	40	30	35	40	30	35	40
Стерня / Stubble	0–10	1/0	1/0	2/0	3/2	2/0	3/1	1/0	3/0	1/0
Дискованная стерня / Disked stubble		2/0	2/0	1/1	1/0	1/1	2/1	2/0	3/0	2/0
Черный пар / Autumn fallow		3/0	3/0	3/0	1/0	2/0	2/0	3/0	1/0	1/0
Стерня / Stubble	10–20	1/0	0/0	0/0	1/0	1/0	1/0	0/0	1/0	1/0
Дискованная стерня / Disked stubble		0/0	1/0	1/0	1/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Черный пар / Autumn fallow		1/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Стерня / Stubble	20–30	0/4	0/2	0/1	0/0	0/3	0/3	0/1	0/1	0/1
Дискованная стерня / Disked stubble		0/0	0/0	1/0	0/2	0/0	0/0	0/0	0/1	0/2
Черный пар / Autumn fallow		0/1	0/1	0/2	0/1	1/2	0/1	0/2	0/1	0/1
Стерня / Stubble	30–40	0/0	0/1	0/3	0/1	0/0	0/0	0/2	0/4	0/2
Дискованная стерня / Disked stubble		0/1	0/2	0/1	0/1	0/2	0/1	0/2	0/1	0/1
Черный пар / Autumn fallow		0/0	0/1	0/0	0/2	0/0	0/0	0/0	0/1	0/2

Следует отметить, что при наличии прутков в конструкции рабочего органа, глыбы сосредоточены в основном в верхнем горизонте обработанного пласта (0–10 см), а при их отсутствии – в нижних горизонтах (20–30 и 30–40 см).

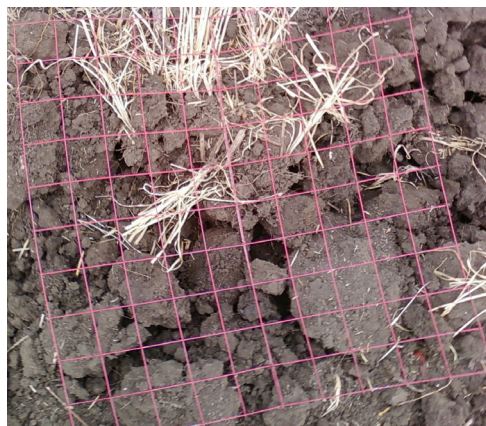
При отсутствии прутков в конструкции глубокорыхлителя глыбы крупнее 100 мм остаются недоступными дополнительному приспособлению для крошения (рис. 2, 3).



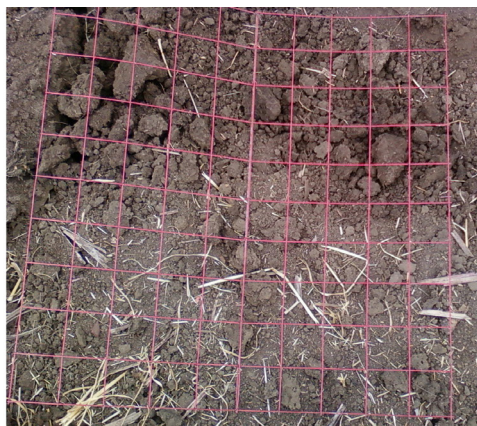
Р и с. 2. Определение глыбистости в горизонте 20–30 см после прохода
глубокорыхлителя без прутков

F i g. 2. Determination of lumpiness in the 20–30 cm layer after passing a deep ripper without rods

Источник: здесь и далее фотографии сделаны Г. Г. Пархоменко при полевом испытании в 2024 г.
Source: hereinafter in the article the photos were taken during field testing by G. G. Parkhomenko in 2024.



a)



b)



c)

Р и с. 3. Определение глыбистости после прохода рабочего органа
глубокорыхлителя с прутками:

а) горизонт 0–10 см; б) горизонт 10–20 см; в) горизонт 20–30 см

Fig. 3. Determination of lumpiness after passing the deep ripper tool with rods:

a) layer 0–10 cm; b) layer 10–20 cm; c) layer 20–30 cm

Следует отметить, что до обработки почва была сильно уплотненной во всех горизонтах ($1,25\text{--}1,66\text{ г/см}^3$), то есть плотность составляла выше $1,25\text{ г/см}^3$.

По результатам анализа плотности почвы после обработки глубокорыхлителем с прутками фона ДС наблюдается рыхлый слой ($0,90\text{--}0,95\text{ г/см}^3$) на 0–10 и 10–20 см ($0,59$ и $0,81\text{--}0,82\text{ г/см}^3$ соответственно).

На фоне ЧП рыхлым после обработки является только слой 0–10 см ($0,76\text{--}0,77\text{ г/см}^3$), а глубже лежащий 10–20 см – уплотненный ($1,22\text{--}1,23\text{ г/см}^3$), с интервалом данной характеристики физико-механических свойств $1,15\text{--}1,25\text{ г/см}^3$. На обоих исследуемых фонах отсутствуют слои нормальной плотности ($0,95\text{--}1,15\text{ г/см}^3$).

Нижние слои 20–30 и 30–40 см на обоих фонах являются сильно уплотненными (табл. 6). Их плотность превышает $1,25\text{ г/см}^3$ (на 20–30 см $1,69\text{--}1,71\text{ г/см}^3$ и $1,82\text{--}1,83\text{ г/см}^3$; на 30–40 см $1,85\text{ г/см}^3$ и $1,75\text{--}1,77\text{ г/см}^3$ для ДС и ЧП соответственно).

Таблица 6

Table 6

Плотность почвы до и после прохода глубокорыхлителя с прутками

Soil density before and after the passing of a deep ripper with rods

Фон / Background	Горизонт, см / Layer, cm	Фактическое значение / Actual value			Рекомендуемое значение / Recommended value
Дискованная стерня до / Disked stubble before	0–10	1,37	1,37	1,37	0,90–0,95 г/см ³ – рыхлый; 0,95–1,15 г/см ³ – нормальной плотности; 1,15–1,25 г/см ³ – уплотненный; свыше 1,25 г/см ³ – сильно уплотненный / 0,90–0,95 g/cm ³ – loose; 0,95–1,15 g/cm ³ – normal density; 1,15–1,25 g/cm ³ – compacted; over 1.25 g/cm ³ – highly compacted
	10–20	1,46	1,47	1,46	
	20–30	1,50	1,50	1,50	
	30–40	1,60	1,61	1,61	
Дискованная стерня после / Disked stubble after	0–10	0,59	0,59	0,59	0,90–0,95 г/см ³ – рыхлый; 0,95–1,15 г/см ³ – нормальной плотности; 1,15–1,25 г/см ³ – уплотненный; свыше 1,25 г/см ³ – сильно уплотненный / 0,90–0,95 g/cm ³ – loose; 0,95–1,15 g/cm ³ – normal density; 1,15–1,25 g/cm ³ – compacted; over 1.25 g/cm ³ – highly compacted
	10–20	0,82	0,81	0,82	
	20–30	1,71	1,69	1,69	
	30–40	1,85	1,85	1,85	
Черный пар до / Autumn fallow before	0–10	1,26	1,26	1,25	0,90–0,95 г/см ³ – рыхлый; 0,95–1,15 г/см ³ – нормальной плотности; 1,15–1,25 г/см ³ – уплотненный; свыше 1,25 г/см ³ – сильно уплотненный / 0,90–0,95 g/cm ³ – loose; 0,95–1,15 g/cm ³ – normal density; 1,15–1,25 g/cm ³ – compacted; over 1.25 g/cm ³ – highly compacted
	10–20	1,63	1,63	1,64	
	20–30	1,65	1,66	1,66	
	30–40	1,52	1,54	1,53	
Черный пар после / Autumn fallow after	0–10	0,77	0,77	0,76	0,90–0,95 г/см ³ – рыхлый; 0,95–1,15 г/см ³ – нормальной плотности; 1,15–1,25 г/см ³ – уплотненный; свыше 1,25 г/см ³ – сильно уплотненный / 0,90–0,95 g/cm ³ – loose; 0,95–1,15 g/cm ³ – normal density; 1,15–1,25 g/cm ³ – compacted; over 1.25 g/cm ³ – highly compacted
	10–20	1,22	1,23	1,23	
	20–30	1,83	1,82	1,82	
	30–40	1,77	1,75	1,77	

Превышение плотности нижних слоев пласта, обработанного глубокорыхлителем с прутками, отчасти объясняется снижением порозности ввиду извлечения крупных комков в верхние горизонты почвы, а также применением в конструкции плоскорезных лап, функционирование которых основано на использовании деформаций сжатия при их работе.

При использовании плоскорезных лап в конструкции рабочий орган выполняет сплошное рыхление пласта, что противоречит основе технологического процесса чизеля, функционирующего с недорезом пласта по ширине захвата и формирующего прорезь трапециевидной формы в поперечном сечении.

Плоскорезная лапа при сплошном рыхлении почвы уплотняет ее при сжатии, тогда как при недорезе пласта комки скалываются при растяжении, менее энергос затратной деформации⁶.

Применение плоскорезной лапы в данной конструкции оправдано только необходимостью крепления к ней прутков. Плоскорезная лапа выполняет функцию салазок, обеспечивая выполнение технологического процесса скольжения с уплотнением. Лапы могут служить расширителями прорези, но в данной конструкции они излишни, поскольку рабочий орган с одним долотом за счет скола по опережающей трещине охватывает такую же ширину обработанной полосы, что и другие варианты. Следует отметить, ширина захвата всех вариантов рабочего органа глубокорыхлителя составляла в среднем 380–400 мм, не зависимо от наличия плоскорезных лап в конструкции.

При отсутствии плоскорезных лап в конструкции наблюдается лучшее сохранение стерни на поверхности почвы (60 %), чем у других вариантов рабочего органа глубокорыхлителя.

⁶ Зеленин А. Н. Резание грунтов. М. : Изд-во АН СССР, 1959. 271 с.

Порозность почвы как функция плотности также не достигает оптимальной (свыше 50 %) в нижних слоях (37 и 32–33 % на 20–30 см; 31 и 34–35 % на 30–40 см для ДС и ЧП соответственно).

Оптимальная порозность (свыше 50 %) наблюдается (табл. 7) только в верхних слоях пласта (78 и 71 % на 0–10 см; 70 и 54–55 % на 10–20 см для ДС и ЧП соответственно).

Т а б л и ц а 7

Table 7

Порозность почвы после прохода глубокорыхлителя с прутками
Soil porosity after passing of a deep ripper with rods

Фон / Background	Горизонт, см / Layer, cm	Фактическое значение / Actual value			Рекомендуемое значение / Recommended value
Дискованная стерня / Disked stubble	0–10	78	78	78	Свыше 50 % / Over 50%
	10–20	70	70	70	
	20–30	37	37	37	
	30–40	31	31	31	
Черный пар / Autumn fallow	0–10	71	71	71	
	10–20	55	54	54	
	20–30	32	33	33	
	30–40	34	35	34	

Снижение порозности менее 50 % указывает на недостаточное количество воздуха внутри обработанного пласта и запасов влаги или возможности ее накопления.

Помимо этого оснащение конструкции рабочего органа глубокорыхлителя плоскорезными лапами значительно увеличивает его тяговое сопротивление (табл. 8), тогда как монтаж прутков оказывает меньшее влияние на данный показатель. Так, при скорости 1,81–2,93 м/с оснащение стойки с долотом плоскорезными лапами приводит к увеличению тягового сопротивления на 29,9 %, а монтаж на них прутков еще на 2,5 %.

Т а б л и ц а 8

Table 8

Тяговое сопротивление вариантов рабочего органа глубокорыхлителя, кН
Traction resistance of variants of the deep ripper tool, kN

Фон / Background	Варианты рабочего органа глубокорыхлителя / Options for the deep ripper tool		
	Стойка с долотом / Stand with a chisel	Стойка с долотом и плоскорезными лапами / Stand with a chisel and sweeps	Стойка с долотом, плоскорезными лапами и прутками / Stand with a chisel, sweeps and rods
Стерня / Stubble	5,78–9,29	8,92–10,91	9,08–12,21
Дискованная стерня / Disked stubble	8,15–9,15	9,71–12,65	9,61–12,16
Черный пар / Autumn fallow steam	6,85–8,25	9,13–10,94	10,15–12,99
В среднем / On average	7,54	10,76	11,04

Обсуждение и заключение. Таким образом, установлена целесообразность оснащения криволинейными прутками конструкции рабочего органа глубокорыхлителя. Прутки выполняют подъем глыб из недоступного поверхностным рабочим органам горизонта почвы на поверхность поля. Это подтверждается тем, что при наличии прутков в конструкции рабочего органа глыбы сосредоточены в основном в верхнем горизонте обработанного пласта (0–10 см), а при их отсутствии – в нижних горизонтах (20–30 и 30–40 см). После прохода глубокорыхлителя с прутками внутри пласта установилась абсолютная влажность, совпадающая с нижним горизонтом необработанной почвы: 15,30–15,70 % (на стерневом фоне), что свидетельствует о перемещении слоев в процессе рыхления. На фоне ДС также наблюдается перемещение влажных слоев почвы в верхние горизонты после прохода глубокорыхлителя с прутками: влажность почвы с 13,20–13,25 % увеличилась до 16,80–17,40 % на глубине 0–10 см и с 12,90–13,85 % до 15,25–15,90 % на глубине 10–20 см. По фону ЧП влажность в горизонтах 0–10 и 10–20 см повышается после обработки за счет извлечения комков на поверхность (с 14,93 до 20,47 % и с 18,13 до 20,03 % в среднем соответственно).

С целью извлечения глыб на поверхность поля данная конструкция рабочего органа глубокорыхлителя с прутками эффективна при функционировании на глубину до 40 см при скорости движения 1,81–2,93 м/с на стерневом фоне, в том числе без обработки, на ЧП.

Оснащение глубокорыхлителя плоскорезными лапами данной конструкции с целью разуплотнения целесообразно только на глубину до 20 см, поскольку наблюдается на фоне ДС рыхлый слой на 0–10 и 10–20 см (с плотностью 0,59 и 0,81–0,82 г/см³, порозностью 78 и 70 % соответственно). На фоне ЧП на 0–10 см также наблюдается рыхлый слой после обработки (с плотностью 0,76–0,77 г/см³, порозностью 71 %), а на 10–20 см (с плотностью 1,22–1,23 г/см³ и порозностью 54–55 %) заметно разуплотненный по сравнению с необработанным (1,63–1,64 г/см³).

В дальнейшем для совершенствования конструкции рабочего органа лапы необходимо установить не под прямым углом к стойке в поперечном направлении, а под углом скола почвы, тем самым плоскорез трансформируется в чизель с расширителями щели для улучшения качества обработки и снижения энергозатрат. Возможно совершенствование конструкции рабочего органа глубокорыхлителя за счет увеличения угла установки плоскорезной лапы к дну борозды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Tsvetnov E.V., Makarov O.A., Stokov A.S., Tsvetnova O.B. The Role of Soils in Land Degradation Assessment: A Review. *Eurasian Soil Science*. 2021;54:441–447. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030169>
2. Sándor Z., Magdolna T., Kincses I., László Z., Kátai J., Vágó I. Effect of Various Soil Cultivation Methods on Some Microbial Soil Properties. *DRC Sustainable Future*. 2020;(1):14–20. URL: <https://clck.ru/3MHPN> (дата обращения: 25.09.2024).
3. Джаббаров Н.И., Добринов А.В. Оптимальное проектирование почвообрабатывающих машин с учетом их потребной мощности. *АгроЭкоИнженерия*. 2021;(1):50–62. <https://doi.org/10.24411/2713-2641-2021-10277>

- Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V. Optimal Designing of Tillage Machines with Due Account for Their Required Power. *AgroEcoEngineering*. 2021;(1):50–62. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2713-2641-2021-10277>
4. Куваев А.Н. Определение удельного сопротивления почвы при глубокой безотвальной обработке в условиях Северного Казахстана. *Тракторы и сельхозмашины*. 2020;87(4):45–52. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-4-45-52>
Kuvayev A.N. Determination of the Specific Soil Resistance Using Deep Subsurface Tillage in Conditions of Northern Kazakhstan. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;87(4):45–52. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-4-45-52>
 5. Андреев В.Л., Дёмшин С.Л., Ильичёв В.В., Носкова Е.Н., Попов Ф.А. Оценка эффективности работы базовой модели многофункционального почвообрабатывающего агрегата. *Вестник НГИЭИ*. 2019;(5):34–47. URL: <https://clck.ru/3MHRQ5> (дата обращения: 25.09.2024).
Andreev V.L., Dyomshin S.L., Ilichev V.V., Noskova E.N., Popov F.A. Evaluation of the Efficiency of Work of the Basic Model of Multifunctional Tillage Unit. *Bulletin of NGIEI*. 2019;(5):34–47. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3MHRQ5> (accessed 25.09.2024).
 6. Джаббаров Н.И., Добринов А.В., Савельев А.П. Моделирование процесса обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(2):175–191. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>
Jabbarov N.I., Dobrinov A.V., Saveluev A.P. Modeling of the Tillage Process by the Method of Stress Concentration in the Tilled Layer. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):175–191. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>
 7. Хазов И.Е., Рахимов И.Р., Рахимов Р.С., Алябьев В.А. Разработка вибрационного рабочего органа глубокорыхлителя. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2024;24(2). <https://doi.org/10.14529/engin240204>
Khazov I.E., Rakhimov I.R., Rakhimov R.S., Alyabiev V.A. Development of a Vibratory Working Organ of a Subsoiler. *Bulletin of the South Ural State University. Series “Mechanical Engineering Industry”*. 2024;24(2). (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14529/engin240204>
 8. Джаббаров Н.И., Добринов А.В. Обоснование конструктивных параметров рабочего органа для рыхления почвы и уничтожения сорных растений в органическом земледелии. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2022;15(1):23–33. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_23
Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V. Validation of the Design Parameters of the Tillage Tool Developed for Soil Loosening and Clean Weeding in Organic Farming. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(1):23–33. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_23
 9. Добринов А.В., Джаббаров Н.И., Чугунов С.В. Сравнительная оценка эффективности рабочих органов для обработки почвы и уничтожения сорных растений. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2022;(2):465–480. URL: <https://clck.ru/3MHuzr> (дата обращения: 29.10.2024).
Dobrinov A.V., Dzhabborov N.I., Chugunov S.V. Comparative Assessment of the Efficiency of Working Parts for Soil Treatment and Destruction of Weeds. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2022;(2):465–480. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3MHuzr> (accessed 29.10.2024).
 10. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Миронова А.В., Золотарев А.С. Многооперационный почвообрабатывающий агрегат. *Агроинженерия*. 2022;24(4):28–31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-28-31>
Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Mironova A.V., Zolotarev A.S. Multi-Operational Tillage Unit. *Agricultural Engineering*. 2022;24(4):28–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-28-31>
 11. Дёмшин С.Л., Зырянов Д.А., Андреев В.Л., Ильичёв В.В. Результаты исследования по определению рациональной конструкционной схемы многофункционального почвообрабатывающего агрегата. *Пермский аграрный вестник*. 2020;(3):13–23. <https://elibrary.ru/nhhgft>

- Demshin S.L., Zyryanov D.A., Andreev V.L., Ilyichev V.V. Research Results on Determining a Rational Design Scheme of a Multifunctional Tillage Unit. *Perm Agrarian Bulletin*. 2020;(3):13–23. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/nhhgft>
12. Shahgoli G., Kanyawi N., Kalantari D. Modeling the Effects of Narrow Blade Geometry on Soil Failure Draught and Vertical Forces Using Discrete Element Method. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*. 2019;29(1):24–33. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.429950>
13. Багиров Г.С., Алекперов Х.Т., Алиев Х.З., Гаманов Р.Н., Гусейнов А.Г. Оптимальные параметры плоскорезов – глубокорыхлителей. *Горное сельское хозяйство*. 2022;(5):9–15. <https://doi.org/10.25691/GSH.2022.5.002>
Bagirov G.S., Alekperov Kh.T., Aliyev Kh.Z., Gamanov R.N., Huseynov A.G. Optimal Parameters of Flat Cutter – Deep Shorecutter. *Gornoe Sel'skoe Khozyaistvo*. 2022;(5):9–15. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25691/GSH.2022.5.002>
14. Швабауэр Ю.А., Субботин С.И., Гапич Д.С., Фомин С.Д. Экспериментальная установка для исследования чизельного агрегата, оборудованного рабочими органами с улучшенными геометрическими характеристиками. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024;(2):394–406. URL: <https://clck.ru/3MHxRi> (дата обращения: 29.10.2024).
Shvabauer Yu.A., Subbotin S.I., Gapich D.S., Fomin S.D. Experimental Installation for the Study of a Chisel Unit Equipped with Working Bodies with Improved Geometric Characteristics. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2024;(2):394–406. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3MHxRi> (accessed 29.10.2024).
15. Кузыченко Ю.А., Катков К.А. Технологический показатель работы МТА при обработке почвы в условиях Предкавказья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022;(2):134–138. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-134-138>
Kuzychenko Yu.A., Katkov K.A. Technological Indicator of the Work of the MTU During Tillage in the Conditions of the Pre-Caucasus. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022;(2):134–138. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-134-138>
16. Борисенко И.Б., Доценко А.Е., Борисенко П.И., Новиков А.Е. Чизелевание почвы: перспективные орудия и способы возделывания широкорядных пропашных культур. *Аграрный научный журнал*. 2015;(7):41–45. <https://elibrary.ru/ubotqj>
Borisenko I.B., Dotsenko A.E., Borisenko P.I., Novikov A.E. Chizeling: Advanced Tools and Harvesting Methods in Wide Row Crops. *The Agrarian Scientific Journal*. 2015;(7):41–45. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ubotqj>
17. Павлюченко Г.В., Садов Р.И. Оптимизация параметров почвообрабатывающего агрегата в степных и лесостепных районах Алтайского края. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2021;(3):126–130. URL: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/175> (дата обращения: 25.10.2024).
Pavlyuchenko G.V., Sado R.I. Optimization of Tillage Unit Parameters in Steppe and Forest-Steppe Regions of the Altai Territory. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021;(3):126–130. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/175> (accessed 25.10.2024).
18. Романюк Н.Н., Нукешев С.О., Тойгамбаев С.К., Теловов Н.К. Оригинальный глубокорыхлитель для улучшения свойств плодородного слоя почвы. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014;(2). URL: <https://clck.ru/3MJ2iC> (дата обращения: 29.10.2024).
Romanuk N.N., Nukeshev S.O., Toigambaev S.K., Telovov N.K. [An Original Subsoiler for Improving the Properties of the Fertile Soil Layer]. *Vestnik Kurskoi Gosudarstvennoi Sel'skokhozyaistvennoi Akademii*. 2014;(2). (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3MJ2iC> (accessed 29.10.2024).
19. Рашидов Т.Р., Джураева Н.Б., Уринов А.П. Моделирование процесса деформирования и движения почвы в зоне воздействия глубокорыхлителя. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2021;(73):81–94. <https://doi.org/10.17223/19988621/73/8>

- Rashidov T.R., Djuraeva N.B., Urinov A.P. Modeling the Process of Strain and Motion of the Soil in a Subsoiler Operation Area. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2021;(73):81–94. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17223/19988621/73/8>
20. Чумаков В.Г., Копыленко Л.Ю. Способы борьбы с уплотнением почвы. *Вестник Курганской ГСХА*. 2014;(2):65–67. URL: <https://clck.ru/3MJ3Z5> (дата обращения: 29.09.2024).
Chumakov V. G., Kopylenko L. Yu. Ways of Fight Against Soil Consolidation. *Vestnik of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2014;2(10):65–67. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3MJ3Z5> (accessed 29.09.2024).
21. Петровец В.Р., Курзенков С.В., Дудко Н.И., Греков Д.В. Математическая модель пахотного слоя почвы как сплошной сыпучей среды, сжимаемой и способной к самоорганизации при ее обработке. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017;(4):160–163. URL: <https://clck.ru/3MJ3on> (дата обращения: 29.10.2024).
Petrovets V.R., Kurzenkov S.V., Dudko N.I., Grekov D.V. [Mathematical Model of the Arable Soil Layer as a Continuous Bulk Medium, Compressible and Capable of Self-Organization During its Processing]. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2017;(4):160–163. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3MJ3on> (accessed 29.10.2024).
22. Зинченко С.И., Зинченко В.С. Формирование плужной подошвы при различных приемах основной обработки серой лесной почвы. *Владимирский земледелец*. 2015;(1):2–6. URL: <https://clck.ru/3MJ4cn> (дата обращения: 29.10.2024).
Zinchenko S.I., Zinchenko V.S. Formation of the Plough Sole at Various Methods of the Main Processing of the Grey Forest Soil. *Vladimir Agricolist*. 2015;(1):2–6. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3MJ4cn> (accessed 29.10.2024).
23. Громовик А.И., Горбунова Н.С. Формирование горизонта плужной подошвы в черноземах и ее сорбционные особенности в отношении органического вещества и тяжелых металлов. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022;22(6):877–884. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10894>
Gromovik A.I., Gorbunova N.S. Formation of the Tillage Pan Bottom Horizon in Black Soils and its Sorption Features with Respect to Organic Matter and Heavy Metals. *Sorption and Chromatography Processes*. 2022;22(6):877–884. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10894>
24. Плиско И.В. Проявление физической деградации пахотных почв Украины и пути ее преодоления (аналитический обзор). *Почвоведение и агрохимия*. 2016;(2):141–153. URL: http://aw.belab.by/russian/science/soilandagro_pdf/57/57-14.pdf (дата обращения: 29.10.2024).
Plisko I.V. The Manifestation of Physical Degradation on Arable Lands in Ukraine (the Literary Review). *Soil Science and Agrochemistry*. 2016;(2):141–153. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://aw.belab.by/russian/science/soilandagro_pdf/57/57-14.pdf (accessed 29.10.2024).
25. Андреева О.В., Куст Г.С. О возможности достижения устойчивого землепользования на землях, подверженных эрозии: вопросы управления и моделирования. *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2024;79(3):38–48. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-3-38-48>
Andreeva O.V., Kust G.S. Is it Possible to Achieve Sustainable Land Management on Land Affected by Erosion: Issues of Modeling Options. *Lomonosov Soil Science Journal*. 2024;79(3):38–48. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-3-38-48>
26. Бельц А.Ф., Гузенко К.Е. Совершенствование рабочей схемы multifunctionального почвообрабатывающего посевного агрегата. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2024;91(4):421–429. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321846>
Belts A.F., Guzenko K.E. Improvement of the Functional Layouts of Multifunctional Soil-Cultivating Sowing Units. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(4):421–429. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321846>
27. Бойков В.М., Старцев С.В., Павлов А.В., Окас К.К. Рациональная технология безотвальной основной обработки почвы. *Аграрный научный журнал*. 2017;(2):44–46. URL: <https://agrojr.ru/index.php/asj/article/view/31/26> (дата обращения: 29.10.2024).

- Boykov V.M., Startsev S.V., Pavlov A.V., Okas K.K. Rational Technology of Subsoil Tillage. *The Agrarian Scientific Journal*. 2017;(2):44–46. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://agrojr.ru/index.php/asj/article/view/31/26> (accessed 29.10.2024).
28. Бобков С.И., Астафьев В.Л. Орудие для измельчения сидератов на поверхности почвы в технологии органического земледелия. *Сельскохозяйственные технологии*. 2019;1(1). URL: <https://clck.ru/3MJ9iy> (дата обращения: 29.10.2024).
- Bobkov S.I., Astafiev V.L. Tool for Crushing Green Manure on the Soil Surface in Organic Farming Technology. *Agricultural Technologies*. 2019;1(1). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3MJ9iy> (accessed 29.10.2024).

Об авторах:

Пархоменко Галина Геннадьевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела механизации растениеводства, лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. им. Ленина, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, Researcher ID: D-2633-2019, Scopus ID: 57211208305, SPIN-код: 6048-2834, parkhomenko.galya@yandex.ru

Божко Игорь Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механизации растениеводства, лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. им. Ленина, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Researcher ID: E-9518-2016, Scopus ID: 57204682997, SPIN-код: 8506-5144, i.v.bozhko@mail.ru

Камбулов Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства, лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. им. Ленина, д. 14), профессор кафедры технологий и оборудования переработки продукции АПК Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Researcher ID: A-6156-2019, Scopus ID: 57204644631, SPIN-код: 3854-2942, kambulov.s@mail.ru

Бужинский Никита Владимирович, аспирант, инженер отдела механизации растениеводства, лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. им. Ленина, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8968-4337>, SPIN-код: 4551-7297, 27091999n@gmail.com

Вклад авторов:

Г. Г. Пархоменко – разработка и проектирование методологии исследования; 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.

И. В. Божко – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов; 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. И. Камбулов – формулирование идеи исследования, целей и задач; контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

Н. В. Бужинский – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 19.12.2024; поступила после рецензирования 13.01.2025;
принята к публикации 21.01.2025*

About the authors:

Galina G. Parkhomenko, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Research Center “Donskoy” (14 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, Researcher ID: D-2633-2019, Scopus ID: 57211208305, SPIN-code: 6048-2834, parkhomenko.galya@yandex.ru

Igor V. Bozhko, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Research Center “Donskoy” (14 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Researcher ID: E-9518-2016, Scopus ID: 57204682997, SPIN-code: 8506-5144, i.v.bozhko@mail.ru

Sergey I. Kambulov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Research Center “Donskoy” (14 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), Professor of the Department “Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products”, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Researcher ID: A-6156-2019, Scopus ID: 57204644631, SPIN-code: 3854-2942, kambulov.s@mail.ru

Nikita V. Buzhinsky, Postgraduate Student, Engineer of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Research Center “Donskoy” (14 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8968-4337>, SPIN-code: 4551-7297, 27091999n@gmail.com

Authors contribution:

G. G. Parkhomenko – developing the study methodology; conducting the study, specifically performing the experiments and collecting the data; preparing the manuscript, specifically critical reviewing of the manuscript draft, commentaries or revisions at pre- or post-publication stages.

I. V. Bozhko – conducting the study, specifically performing the experiments; preparing the manuscript, specifically critical reviewing of the manuscript draft, commentaries or revisions at pre- or post-publication stages.

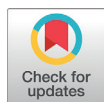
S. I. Kambulov – formulating the ideas, objectives and tasks of the study; oversighting and mentoring during planning and conducting the study.

N. V. Buzhinsky – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting the data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 19.12.2024; revised 13.01.2025; accepted 21.01.2025

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.318-332>

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

УДК 631.31

Оригинальная статья / Original article

Моделирование эмиссии углекислого газа при обработке почвы

Н. И. Джаббаров¹, А. В. Добринов¹✉,
А. П. Мишанов¹, А. П. Савельев²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства (ИАЭП) –
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. Актуальность темы исследования связана с проблемой снижения выбросов климатически активных веществ на используемых сельскохозяйственных угодьях. По оценкам ученых 25–40 % выделяемых газов (особенно оксида азота и углекислого газа) имеют почвенное происхождение. На величину их выделения с пахотных земель, наряду с температурой и влажностью, оказывают существенное влияние способы обработки почвы. В связи с этим математическое моделирование эмиссии углекислого газа при различных системах обработки почвы является актуальной задачей.

Цель исследования. Разработка математической модели для определения и прогнозирования эмиссии углекислого газа в результате различных способов обработки почвы.

Материалы и методы. Применялись методы математического моделирования процесса эмиссии углекислого газа с учетом данных по измерению выделения газа с использованием метода камер и датчика CDD 24 HTL.

Результаты исследования. Разработана математическая модель для определения и прогнозирования эмиссии углекислого газа при различных способах обработки почвы. На основе экспериментальных данных получены значения постоянных величин и угловых коэффициентов, характеризующих интенсивность эмиссии углекислого газа в конкретных условиях проведения основной отвальной обработки почвы. Для рассматриваемого технологического процесса основной отвальной обработки почвы эмиссия углекислого газа находилась в пределах от 11,3 до 92,4 кг с 1 га площади (или от 1,13 до 9,23 г с 1 м²).

Обсуждение и заключение. Эмиссия углекислого газа, поступающего в атмосферу вследствие деятельности человека и применения им разных способов обработки почвы при производстве продукции растениеводства, оказывает негативное влияние на состояние окружающей среды. На величину эмиссии воздействуют почвенно-

© Джаббаров Н. И., Добринов А. В., Мишанов А. П., 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.

климатические особенности региона, поэтому ее величина может существенно отличаться. Это обстоятельство требует проведения работ по изучению величины эмиссии для условий конкретного региона. Проводимые исследования направлены на совершенствование методов оценки прогнозирования эмиссии газов и могут быть использованы в растениеводстве.

Ключевые слова: эмиссия диоксида углерода, растениеводство, способы обработки почвы, моделирование процесса

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Джабборов Н.И., Добринов А.В., Мишанов А.П., Савельев А.П. Моделирование эмиссии углекислого газа при обработке почвы. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(2):318–332. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.318-332>

Simulating Carbon Dioxide Emissions when Cultivating Soil

N. I. Jabborov^a, A. V. Dobrinov^a✉,
A. P. Mishanov^a, A. P. Savelyev^b

^a *Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) 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 urgency of the study is related to the problem of reducing emissions of climate-impacting substances used on agricultural areas. According to current estimates of scientists, 25–40% of climate-impacting gases (especially nitrous oxide and carbon dioxide) are of soil origin. The methods of soil cultivation together with temperature and humidity significantly affected the emissions of climate-impacting gases from plowed lands. In this regard, mathematical simulation of carbon dioxide emissions when using different methods of soil cultivation is a topical task.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a mathematical model for determining and forecasting carbon dioxide emissions from soil cultivated with different methods.

Materials and Methods. In the study, there were used the methods of mathematical simulation of the carbon dioxide emission process taking into account the data on gas emission assessing through using the chamber and the sensor CDD 24 HTL.

Results. A mathematical model has been developed for assessing and forecasting carbon dioxide emission from soil cultivated with different methods. Based on the experimental data, there have been obtained the constant values and angular coefficients characterizing the intensity of carbon dioxide emission in specific conditions of basic moldboard soil cultivation. For the technological process of basic moldboard soil cultivation, the carbon dioxide emission was in the range from 11.3 to 92.4 kg from 1 ha of area (or from 1.13 to 9.23 g per 1 m²).

Discussion and Conclusion. The carbon dioxide emission into the atmosphere caused by human activities and by using different methods of soil cultivation in producing crop products has a negative impact on the environment. The soil and climatic features of the region influence the emission values, so these values can vary significantly. This fact requires the study of the emission value for the conditions of a particular region. The study is aimed at improving the methods for assessing and forecasting gas emissions and can be used in crop production.

Keywords: carbon dioxide emissions, crop production, soil cultivation methods, process simulation

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

For citation: Jabborov N.I., Dobrinov A.V., Mishanov A.P., Savelyev A.P. Simulating Carbon Dioxide Emissions when Cultivating Soil. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):318–332. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.318-332>

Введение. Технологии возделывания сельскохозяйственных культур связаны с обработкой почвы различными способами и техническими средствами, оказывающими определенное негативное влияние на окружающую среду. При обработке почвы движители машино-тракторных агрегатов создают значительное давление, из-за чего происходит переуплотнение поверхности поля, изменение в структурно-агрегатном состоянии почвы. Обработка почвы меняет ее биологические свойства (главным образом состав и численность микроорганизмов) и влияет на содержание в ней гумуса. Также обработка почвы оказывает существенное воздействие на выделение парниковых газов.

Необходимость обеспечения населения продуктами питания и получения продукции на экспорт вынуждает сельскохозяйственных производителей наращивать объемы производства. Это происходит за счет применения интенсивных технологий в растениеводстве и увеличения поголовья скота. Данные действия способствуют повышению антропогенного воздействия на окружающую среду. Использование химических удобрений и пестицидов с нарушением правил их применения наносит существенный вред природе и негативно сказывается на здоровье человека [1].

Для снижения негативного влияния технологических процессов и технических средств на окружающую среду необходимо контролировать текущее состояние и прогнозировать эмиссию климатически активных веществ, а на основании прогноза управлять процессами выбросов. Разработка высоко вероятностных моделей прогнозирования выбросов парниковых газов позволит создать эффективные технико-технологические решения по их снижению во время возделывания сельскохозяйственных культур.

Целью работы является моделирование эмиссии CO_2 при различных способах обработки почвы.

Обзор литературы. Глобальное изменение климата ученые связывают с увеличением поступления парниковых газов в атмосферу. Основным источником данного поступления считается деятельность человека, имеющая тенденцию к постоянному росту. Объемы выделения в атмосферу климатически активных веществ (КАВ) от агропромышленного комплекса Российской Федерации занимают третье место и составляют порядка 121,28 млн т CO_2 -экв. (по состоянию на 2021 г.), что соответствует 5,6 % от общих выбросов [1]. Для сокращения поступления КАВ необходимо проведение работ по изучению факторов, влияющих на их возникновение применительно ко всем отраслям производства, включая растениеводство.

Одним из направлений в растениеводстве, ориентированным на снижение негативной нагрузки на окружающую среду, является возделывание растений в органическом земледелии. Это связано с запретом на использование минеральных удобрений и пестицидов. При этом особое внимание уделяется применению

научно обоснованных севооборотов и приемам обработки почвы, способствующих сокращению количества эмиссии газов. Необходимо учитывать, что переход на органическое земледелие, в силу действующих ограничений на законодательном уровне, влечет снижение урожайности и увеличение себестоимости конечной продукции минимум на первоначальном этапе [1].

Актуальность проблемы, связанной с увеличением эффекта парниковых газов привлекла внимание ученых всего мира. В настоящее время имеется целый ряд исследований, посвященных данной проблеме. Экспериментально установлено, что на выбросы газов влияют водный и температурный режимы почвы, нормы вносимых удобрений, способы обработки почвы и сезонные колебания температуры [2; 3]. Мульчирование поверхности поля влияет на водный режим в почве, что способствует снижению выбросов парниковых газов [4]. Данный вариант может быть рассмотрен в качестве мер по снижению выбросов КАВ в растениеводстве. Минерализация растительных остатков происходит с участием микроорганизмов, скорость работы которых зависит от влияния факторов окружающей среды [5]. Установлено, что растительные остатки играют очень важную роль в сельском хозяйстве, поскольку они могут быть использованы как в качестве экологически безопасной стратегии управления отходами, так и в качестве средства повышения органического вещества в почве. Минерализация растительных остатков в почве требует соответствующих стратегий управления, которые поддерживают растениеводство и защищают качество поверхностных и грунтовых вод. При этом нехватка воды и выбросы CO_2 могут серьезно угрожать устойчивости сельского хозяйства [6]. Авторы данной работы считают, что интегрированная система может повысить урожайность и улучшить сбор воды, одновременно увеличивая потенциал поглощения углерода растениями.

Одной из важных задач обеспечения баланса потребления и выделения углекислого газа является поддержание здоровья почвы. Одним из возможных вариантов является мульчирование растительных остатков, которое способствует сохранению здоровья почвы и повышению продуктивности культур за счет умеренного влияния на температурный режим почвы и усиленного удержания влаги [7]. Мульчирование соломой способствует поддержанию сравнительно более высокого содержания влаги в почве (примерно на 2 %) и снижению температуры почвы (примерно на 1,72 °C) в период роста культуры. Одними из факторов, оказывающих влияние на эмиссию КАВ из почвы, являются варианты внесения навоза под различные культуры и способы обработки почвы. При проведении исследований влияния указанных факторов на пахотных темно-каштановых почвах наблюдались высокие значения выбросов парниковых газов [8]. Значения эмиссии CO_2 зависят от температуры почвы и воздуха, однако авторами [9] выявлено, что большее влияние оказывает влажность почвы, которая напрямую зависит от количества выпадающих осадков.

В растениеводстве, с точки зрения изучения величины выбросов КАВ в атмосферу, особое внимание необходимо уделять виду и дозам внесенных удобрений, а также способам обработки почвы. При сравнении воздействия на величину парникового эффекта применение удобрений оказывается выше, чем от проведения технологических операций обработки почвы [10]. Каждый из способов обработки почвы (отвальная вспашка, мелкая безотвальная обработка и т. д.) по-своему

оказывает влияние на эмиссию азота из серых лесных среднесуглинистых почв. Вспашка с применением минеральных удобрений приводит к наиболее высокой эмиссии N_2O . В теплый период года эмиссия CO_2 может до 4,5 раз превышать эмиссию в холодный период¹. Концентрация CO_2 повышается с увеличением глубины участка. На глубине порядка 50 см наблюдается наибольшая концентрация. При этом содержание кислорода при увеличении глубины снижается [11].

Процессы, протекающие в почве и оказывающие влияние на выбросы, зависят не только от способов ее обработки, но и от возраста почвы. При разработке мер по снижению эмиссии КАВ в технологии производства продукции растениеводства необходимо учитывать погодные условия, особенно количество выпадающих осадков [12; 13]. Применение нулевой обработки почвы позволяет сократить на 7,6 % выделение парниковых газов с сохранением урожайности культуры, по сравнению с традиционной обработкой почвы. Помимо доз внесения удобрений на выбросы оказывают влияние физико-химические свойства почвы и соотношение C:N [14]. Ежегодное проведение отвальной обработки почвы способствует возникновению наибольшей эмиссии N_2O , по сравнению с другими видами обработки почвы [15]. В процессе вспашки происходит нарушение целостности пласта, что приводит к немедленному высвобождению CO_2 из почвы [16]. Пики потоков N_2O увеличиваются при отвальной обработке почвы в период с относительно теплыми и влажными погодными условиями [17; 18]. Сокращение интенсивности обработки почвы затрудняет переработку органического вещества микроорганизмами и снижает потери углерода и азота из почвы, а любое механическое вмешательство способствует ускорению минерализации азота, увеличивая его эмиссию [19]. При возделывании различных культур требуется применение различных доз и типов удобрений, а также приемов подготовки почвы, что по-разному сказывается на величину эмиссии парниковых газов². Обеспечение изоляции материала отвала от доступа кислорода при рекультивации почвы позволяет снизить поступление КАВ в атмосферу³. Обеспечение данного условия также может быть использовано как один из вариантов снижения эмиссии КАВ при обработке почвы.

Для реализации возможности определения объемов выбросов и прогнозирования КАВ необходимо создание моделей, полученных на основании многочисленных эмпирических данных, причем в различных регионах данные модели могут иметь различную адекватность. Авторы исследования [20] разработали модель для оценки эмиссии парниковых газов из органических почв как с природным растительным

¹ Павлик С. В. Оценка эмиссии парниковых газов из сельскохозяйственных почв при использовании различных агротехнологий : автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2012. 26 с.

² Карашаева А. С. Оценка размеров эмиссии парниковых газов при выращивании сельскохозяйственных культур // Развитие современной аграрной науки: актуальные вопросы, достижения и инновации : Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти заслуженного деятеля науки РСФСР, д-ра сельскохозяйственных наук, проф. П. Г. Лучкова (8 февраля 2024 г., г. Нальчик). Нальчик : Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, 2024. С. 92–98. <https://elibrary.ru/hgvyhh>

³ Рекультивированные отвалы как депонирующая среда актуального и отложенного углеродного следа / П. П. Кречетов [и др.] // Почвы и окружающая среда : Всеросс. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (2 – 6 октября 2023 г., г. Новосибирск). Новосибирск : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН, 2023. С. 543–548. <https://elibrary.ru/yzfupm>

фоном, так и при возделывании продукции растениеводства. Модель позволяет учитывать поступление углерода в почву, связанное с разложением растительных остатков и органики почвы. Специфика выделения и поглощения газов растениями, особенности природно-климатических условий, суточные колебания эмиссии усложняют получение достоверных данных. Оценка эмиссии климатически активных веществ, проведенная только за период вегетации растений, может оказаться заниженной из-за того, что газ перераспределяется и скапливается в толще почвы [21].

Авторами для проведения данного исследования на первоначальном этапе была проведена классификация критериев экологической безопасности технических средств [22], обоснованы основные показатели оценки эффективности технологий в растениеводстве [23], на их основе получена математическая модель для прогнозирования эмиссии парниковых газов от уровня применяемых технологий [24]. В дальнейшем разработана методика оценки и прогнозирования негативного влияния машинно-тракторных агрегатов на окружающую среду, а также методика уровня выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур [25; 26], которые являются сформированной базовой составляющей для моделирования процессов выделения КАВ в технологической системе обработки почвы.

Материалы и методы. Объектом исследований является технологический процесс обработки почвы отвальным, безотвальным и минимальным способами. Закономерности изменения потоков углекислого газа (CO_2) при различных способах обработки почвы на соответствующих им агрофонах являются предметом исследования.

При проведении настоящих исследований применялись методы математического моделирования, обобщения экспериментальных данных в процессе исследования эмиссии CO_2 в зависимости от вида обработки почвы.

Для проверки адекватности предлагаемой математической модели на агроэкологическом полигоне опытной станции ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024 г. были проведены измерения эмиссии CO_2 при различных способах обработки почвы. Измерения проводили на опытных делянках размером 120×80 м при следующих условиях: температура воздуха $24\text{--}26^\circ\text{C}$; влажность почвы 18 %; скорость ветра 1–3 м/с; атмосферное давление 767 мм рт. ст.; тип почвы – дерново-подзолистая на карбонатном суглинке; наклон рельефа поля не более 2° .

До начала обработки твердость почвы в слое 0...10 см составляла 0,54 МПа; в слое 10...20 см – 0,73 МПа; в слое 20...30 см – 2,93 МПа.

На рисунках 1–3 представлено проведение отвальной, безотвальной и минимальной обработки почвы с соответствующими почвообрабатывающими орудиями при агрегатировании трактором МТЗ-82.1.

Измерение величины выбросов CO_2 из почвы при проведении различных операций выполняли, используя метод закрытых камер. Камера выполнена из элемента трубы с раструбом и заглушки ($d = 160$ мм), изготовленной из поливинилхлорида. Внутри камеры размещена измерительная часть серийно выпускаемого датчика CDD 24 HTL, позволяющая одновременно с CO_2 измерять температуру и влажность внутри камеры (рис. 4).



Р и с. 1. Вспашка почвы агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р

F i g. 1. Plowing the soil with the MTZ-82.1+PKMP-3-40R unit



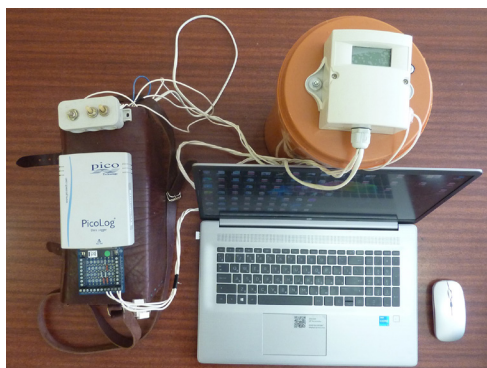
Р и с. 2. Глубокое рыхление почвы агрегатом МТЗ-82.1+УКПА 2.4-2

F i g. 2. Chiseling the soil with the MTZ-82.1+UKPA 2.4-2 unit



Р и с. 3. Культивация агрегатом МТЗ-82.1+Kombi-3

F i g. 3. Cultivation with the MTZ-82.1+Kombi-3 unit



Р и с. 4. Оборудование для измерения величины выбросов CO₂ из почвы

F i g. 4. Equipment for measuring the CO₂ emissions from soil

Источник: фотографии для рисунков 1–4 сделаны А. В. Добриновым при проведении эксперимента по измерению эмиссии CO₂ при различных способах обработки почвы (03.09.2024 г.).

Source: photographs for figures 1–4 were taken by the A. V. Dobrinov during an experiment to measure CO₂ emissions with using various soil cultivation methods on 03.09.2024.

Стандартную ошибку выборочного среднего значения массы выбросов CO₂ в эксперименте рассчитывали по формуле:

$$S_{\bar{M}_{\text{пг}}} = \frac{\sigma_{M_{\text{пг}}}}{\sqrt{n}},$$

где $\sigma_{M_{\text{пг}}}$ – среднее квадратическое отклонение массы CO₂, г·ч/га; n – объем выборки.

Ошибка выборочного среднего значения $S_{\bar{M}_{\text{пг}}}$ массы CO₂ варьировалась в пределах от 3,37 до 6,02 г·ч/га.

Полученные в процессе экспериментальных исследований опытные данные обрабатывались по стандартной методике системы Excel.

Результаты исследования. Выделение климатически активных веществ из почвы зависит от таких весомых факторов, как температура, влажность, степень биологической активности, способов обработки почвы, а также вида, нормы и приемов внесения удобрений.

Разрабатываемая математическая модель должна описывать формализованный процесс эмиссии КАВ из почвы, характерные его закономерности изменения и охватить влияние основных факторов, перечисленных выше, не затрагивая несущественные второстепенные показатели.

Для этого рассмотрим в качестве детерминированной функции $f(x)$ характер эмиссии CO_2 из почвенного горизонта, установленный на основе экспериментальных данных в зависимости от времени начала и окончания технологического процесса обработки, температуры и влажности почвы. Аппроксимировав данные линейной функцией и разбив ее на три отрезка прямых (рис.5), получим:

$$Y = f(x) = \begin{cases} f_1(x) = A_1 + B_1(x) \text{ при } x \leq x_1; \\ f_2(x) = A_2 + B_2(x) \text{ при } x_1 \leq x \leq x_2; \\ f_3(x) = A_3 + B_3(x) \text{ при } x_2 \leq x \leq x_3, \end{cases} \quad (1)$$

где A_1, A_2, A_3 – постоянные величины, которые определяются по формулам:

$$A_1 = \text{CO}_2 e(x_0); \quad (2)$$

$$A_2 = \text{CO}_2 e(x_2) + \frac{[\text{CO}_2 e(x_2) - \text{CO}_2 e(x_1)]}{(x_2 - x_1)}; \quad (3)$$

$$A_3 = \text{CO}_2 e(x_3) + \frac{[\text{CO}_2 e(x_3) - \text{CO}_2 e(x_2)]}{(x_3 - x_2)}; \quad (4)$$

B_1, B_2, B_3 – угловые коэффициенты, которые определяются из выражений:

$$B_1 = \frac{[\text{CO}_2 e(x_1) - \text{CO}_2 e(x_0)]}{(x_1 - x_0)}; \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{[\text{CO}_2 e(x_2) - \text{CO}_2 e(x_1)]}{(x_2 - x_1)}; \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{[\text{CO}_2 e(x_3) - \text{CO}_2 e(x_2)]}{(x_3 - x_2)}; \quad (7)$$

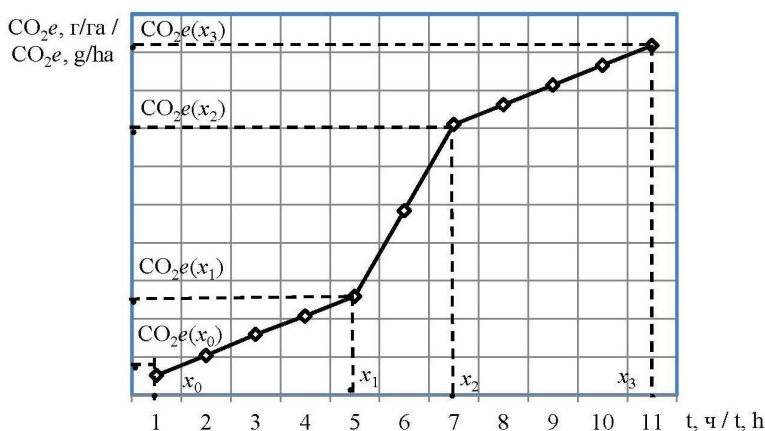
где x_0 – значение аргумента, соответствующее началу измерений эмиссии до обработки почвы; x_1 – значение аргумента, соответствующее началу проведения технологической операции интенсивному выбросу из почвы; x_2 – значение аргумента, соответствующее окончанию интенсивного выброса из почвы; x_3 – значение аргумента, соответствующее началу последующей технологической операции; $\text{CO}_2 e(x_0)$ – выбросы углекислого газа в начале измерений до обработки почвы, г·ч/га; $\text{CO}_2 e(x_1)$ – выбросы углекислого газа в начале проведения технологической операции, г·ч/га; $\text{CO}_2 e(x_2)$ – выбросы углекислого газа, соответствующие

окончанию интенсивности от проведения операции, г·ч/га; $\text{CO}_2e(x_3)$ – выбросы углекислого газа в начале последующей операции, г·ч/га.

Из выражения (1) и рисунка 5 видно, что выбросы CO_2 из почвы определяются линейной зависимостью, то есть $Y = A + Bx$. При нормальном законе распределения аргумента (времени начала и окончания процесса) имеем:

$$\bar{Y} = A + Bm_x.$$

Таким образом, математическое ожидание (или среднее значение) выходного показателя, то есть выделение CO_2 из почвы совпадает с детерминированной функцией.



Р и с. 5. Зависимости эмиссии CO_2 из почвы от времени проведения технологической операции

F i g. 5. Dependence of CO_2 emission from soil on the time of the technological operation

Источник: графики для рисунков 5, 6 составлены авторами статьи.

Source: the graphs for figures 5, 6 were compiled by the authors of the article.

Примечание: $x_0 \dots x_1$ – участок, соответствующий выбросам CO_2 в период от начала измерений до начала обработки почвы; $x_1 \dots x_2$ – участок, соответствующий выбросам CO_2 в период от начала обработки почвы до окончания их интенсивного выделения; $x_2 \dots x_3$ – участок, соответствующий выбросам CO_2 в период от окончания их интенсивности до начала следующей обработки почвы.

Note: $x_0 \dots x_1$ – interval corresponding to CO_2 emissions in the period from the beginning of measurements to the beginning of soil cultivation; $x_1 \dots x_2$ – interval corresponding to CO_2 emissions during the period from the beginning of soil cultivation to the end of their intensive emission; $x_2 \dots x_3$ – interval corresponding to CO_2 emissions from the end of their intensity until the beginning of the next soil cultivation.

С учетом выражения (1) общее количество выбросов CO_2 с поля, где возделывается сельскохозяйственная культура, можно определить по формуле:

$$\text{CO}_2e = [(A_1 + B_1x_1) + (A_2 + B_2x_2) + (A_3 + B_3x_3)], \text{ г} \cdot \text{ч} / \text{га}, \quad (8)$$

где $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – постоянные величины и угловые коэффициенты (2)–(7).

Необходимо отметить, что исходным материалом для определения постоянных величин A_1, A_2, A_3 и угловых коэффициентов B_1, B_2, B_3 служат случайные числа – $\text{CO}_2e(x_0), \text{CO}_2e(x_1), \text{CO}_2e(x_2), \text{CO}_2e(x_3)$ и x_0, x_1, x_2, x_3 , которые определяются

экспериментальным путем для конкретных условий проведения технологических процессов.

В качестве примера произведем расчет эмиссии CO_2 по результатам полученных значений эмиссии CO_2 в процессе основной отвальной обработки почвы, проведенной на агроэкологическом полигоне опытной станции (рис. 1).

В результате расчета определены постоянные величины и угловые коэффициенты, соответствующие почвенно-рельефным и климатическим условиям исследований.

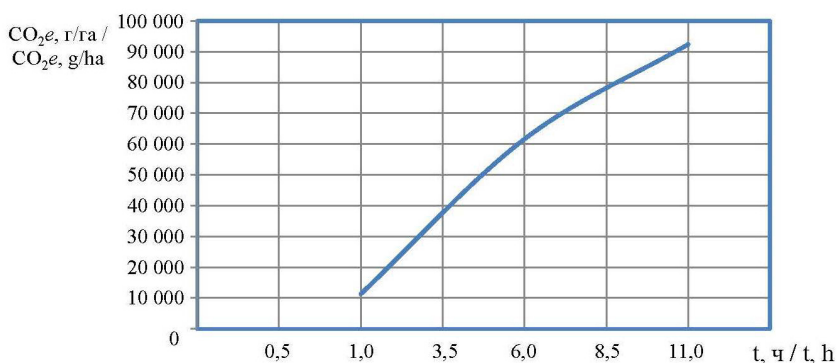
В результате расчета определены постоянные величины, г·ч/га: $A_1 - 1\,030,00$; $A_2 - 18\,711,50$; $A_3 - 19\,357,25$. Также определены угловые коэффициенты, г/га: $B_1 - 2\,057,00$; $B_2 - 4\,510,50$; $B_3 - 1\,036,25$, соответствующие почвенно-рельефным и климатическим условиям проведения исследований.

Наличие математической модели (8) позволяет спрогнозировать эмиссию и по другим способам обработки почвы с учетом интервалов времени до и после выполнения процесса.

В результате расчета эмиссии CO_2 по конкретным периодам во время вспашки почвы пахотным агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р получены следующие значения: эмиссия CO_2 до начала обработки почвы (в течение 5 ч) – 11,3 кг/га; эмиссия CO_2 от начала обработки почвы до окончания его интенсивного выделения (в течение 7 ч) – 61,6 кг/га; эмиссия CO_2 от окончания его интенсивности до начала следующей обработки почвы (в течение 11 ч) – 92,3 кг/га.

Таким образом, для рассматриваемого технологического процесса в конкретных условиях его выполнения эмиссия CO_2 варьирует в пределах от 11 315 до 92 356 г с 1 га площади (или от 1,13 до 9,23 г с 1 м²) в течение 11 ч перед началом вспашки до начала последующей технологической операции.

На основе полученных значений была построена зависимость усредненной суммарной эмиссии CO_2 от продолжительности технологического процесса основной отвальной обработки почвы пахотным агрегатом (рис.6).



Р и с. 6. Зависимость усредненной суммарной эмиссии CO_2 от продолжительности технологического процесса основной обработки почвы пахотным агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р

F i g. 6. Dependence of the average total CO_2 emission on the duration of the technological process of primary soil cultivation by the plowing unit MTZ-82.1+PKMP-3-40R

Представленная закономерность для конкретных условий функционирования процесса вспашки пахотным агрегатом МТЗ-82.1+ПКМП-3-40Р описывается эмпирическим выражением:

$$\text{CO}_2e = -390,58t^2 + 12\,791,06t - 1\,085,48.$$

Аналогичным образом на основании данных характеристики почвы, ее температуры, влажности, степени биологической активности, уровня минерального питания и временных составляющих технологического процесса с помощью разработанной модели можно определить и спрогнозировать выделение КАВ, в частности CO_2 , для процессов глубокого безотвального рыхления и мелкой поверхностной обработки почвы.

Обсуждение и заключение. Разработана математическая модель для определения и прогнозирования выбросов углекислого газа при различных способах обработки почвы и приведен пример расчета эмиссии CO_2 от вспашки. Предложенная модель позволяет описать закономерность выделения газа за весь период проведения отдельной технологической операции.

Для повышения точности вычислений требуются дополнительные экспериментальные исследования по уточнению значений постоянных величин, угловых коэффициентов предложенной модели для различных способов обработки почвы с учетом почвенно-рельефных и климатических условий конкретной зоны возделывания сельскохозяйственных культур. Полученные значения должны быть учтены и структурированы в определенную базу данных о потоках CO_2 при производстве сельскохозяйственной продукции растениеводства.

Для решения проблемы прогнозирования выбросов климатически активных веществ от технологий возделывания сельскохозяйственных культур на основе предложенной модели необходимо разработать обобщенную математическую модель с учетом временных, почвенных и погодных условий региона. Обобщенная математическая модель должна обеспечить с высокой вероятностью прогнозирование суммарной эмиссии климатически активных веществ от начала полевых работ до уборки урожая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Ахметшина Л.Г., Порвадов М.Г., Шангутов А.О. Оценка выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных земель в концепте государственной экологической политики. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023;66(6):566–571. https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_6_566
Akhmetshina L.G., Porvadov M.G., Shangutov A.O. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from the Cultivation of Agricultural Land in the Concept of State Environmental Policy. *International Agricultural Journal*. 2023;66(6):566–571. (In Russ., abstract in Eng) https://doi.org/10.55186/25876740_2023_66_6_566
2. Mühlbachová G., Kusá H., Růžek P., Vavera R. CO_2 Emissions in a Soil Under Different Tillage Practices. *Plant, Soil and Environment*. 2022;68(6):253–261. <https://doi.org/10.17221/110/2022-PSE>
3. Wang W., Akhtar K., Ren G., Yang G., Feng Y., Yuan L. Impact of Straw Management on Seasonal Soil Carbon Dioxide Emissions, Soil Water Content, and Temperature in a Semi-Arid Region of China. *Science of The Total Environment*. 2019;652:471–482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.207>

4. Nishigaki T., Sugihara S., Kilasara M., Funakawa S. Carbon Dioxide Flux and Soil Carbon Stock as Affected by Crop Residue Management and Soil Texture in Semi-Arid Maize Croplands in Tanzania. *Soil Use and Management*. 2021;37(1):83–94. <https://doi.org/10.1111/sum.12680>
5. Grzyb A., Wolna-Maruwka A., Niewiadomska A. Environmental Factors Affecting the Mineralization of Crop Residues. *Agronomy*. 2020;10(12):1951. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>
6. Guo Y., Yin W., Chai Q., Fan Z., Hu F., Fan H., et al. No Tillage with Previous Plastic Covering Increases Water Harvesting and Decreases Soil CO₂ Emissions of Wheat in Dry Regions. *Soil and Tillage Research*. 2021;208:104883. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104883>
7. Noor M.A., Nawaz M.M., Ma W., Zhao M. Wheat Straw Mulch Improves Summer Maize Productivity and Soil Properties. *Italian Journal of Agronomy*. 2021;16(1):1623. <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1623>
8. Кусаинова М.Д., Тойшиманов М.Р., Таменов Т.Б., Сыздык А.Б. Джикуан Ч. Изучение эффективности различных систем землепользования для смягчения климата посредством измерения эмиссии парниковых газов. *Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов*. 2023;9(2):17–34. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-2/17-34>
Kussainova M.D., Toishimanov M.R., Tamenov T.B., Syzdyk A.B., Jiquan C. Studying the Climate Mitigation Efficiency of Various Land-Use Systems by Measuring Greenhouse Gas Emissions. *Central Asian Journal of Water Resources Research*. 2023;9(2):17–34. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-2/17-34>
9. Спыну М.Т., Тихонова М.В., Илюшкова Е.М., Бузылёв А.В., Жигалева Я.С. Динамика эмиссии парниковых газов в почвах экологического стационара РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева. *АгроЭкоИнфо*. 2022;(4). <https://doi.org/10.51419/202124429>
Spynu M.T., Tikhonova M.V., Glushkova E.M., Buzylev A.V., Zhigalova Ya.C. [Dynamics of Greenhouse Gas Emissions in Soils of the Ecological Station of the Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazeva]. *AgroEcoInfo*. 2022;(4). (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/202124429>
10. Shao H. Agricultural Greenhouse Gas Emissions, Fertilizer Consumption, and Technological Innovation: A Comprehensive Quantile Analysis. *Science of the Total Environment*. 2024;926:171979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171979>
11. Кидин В.В., Прасолова А.А. Газообразные потери азота и динамика почвенного дыхания из разных слоев дерново-подзолистей почвы. *Агрохимический вестник*. 2014;(5):29–31. <https://elibrary.ru/stilot>
Kidin V.V., Prasolova A.A. Gaseous Nitrogen Losses and Soil Breath Dynamics of Different Layers from Sod-Podzolic Soils. *Agrochemical Herald*. 2014;(5):29–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/stilot>
12. Bhattacharyya S.S., Dorilêo Leite F.F.G., France C.L., Adekoya A.O., Ros G.H., de Vries W., et al. Soil Carbon Sequestration, Greenhouse Gas Emissions, and Water Pollution Under Different Tillage Practices. *Science of the Total Environment*. 2022;826:154161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154161>
13. Zhao J., Hu Ya., Wang J., Gao W., Liu D., Yang M., et al. Greenhouse Gas Emissions from the Growing Season are Regulated by Precipitation Events in Conservation Tillage Farmland Ecosystems of Northeast China. *Science of the Total Environment*. 2024;948:174716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174716>
14. Shakoor A., Shahbaz M., Farooq T.H., Sahar N.E., Shahzad S.M., Altaf M.M., et al. A Global Meta-Analysis of Greenhouse Gases Emission and Crop Yield Under No-Tillage as Compared to Conventional Tillage. *Science of the Total Environment*. 2021;750:142299. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142299>
15. Зинченко С.И., Бучкина Н.П. Влияние приемов основной обработки серой лесной почвы на эмиссию закиси азота. *Владимирский земледелец*. 2018;(4):7–11. <https://doi.org/10.24411/2225-2584-2018-10032>

- Zinchenko S.I., Buchkina N.P. Influence of Gray Forest Soil Tillage Methods on Nitrogen Oxide Emission. *Vladimir Agricolist*. (In Russ., abstract in Eng.) 2018;(4):7–11. <https://doi.org/10.24411/2225-2584-2018-10032>
16. Willems A.B., Augustenborg C.A., Hepp S., Lanigan G., Hochstrasser T., Kammann C., et al. Carbon Dioxide Emissions from Spring Ploughing of Grassland in Ireland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2011;144(1):347–351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.001>
17. Bleken M.A., Rittl T.F. Soil pH-Increase Strongly Mitigated N₂O Emissions Following Ploughing of Grass and Clover Swards in Autumn: A Winter Field Study. *Science of the Total Environment*. 2022;828:154059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154059>
18. Gong Y., Li P., Lu W., Nishiwaki J., Komatsuzaki M. Response of Soil Carbon Dioxide Emissions to No-Tillage and Moldboard Plow Systems on Andosols in a Humid, Subtropical Climate, Japan. *Geoderma*. 2021;386:114920. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114920>
19. Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО). *Агрохимия*. 2019;(5):3–20. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=agro&y=2019&v=0&n=5&a=Agro1905003Cokolov> (дата обращения: 28.09.2024).
Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Spiridonov Yu.Ya., Toropova E.Yu., Filipchuk O.D. Technological Features of Soil-Protecting Resource-Saving Agriculture (in Development of the FAO Concept). *Agrochemistry*. 2019;(5):3–20. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=agro&y=2019&v=0&n=5&a=Agro1905003Cokolov> (accessed 28.09.2024).
20. Полевой А.Н., Микитюк А.Ю. Моделирование эмиссии CO₂, CH₄, NO, N₂O из органических почв (Peat-GHG-Model). *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2016;27(1):5–26. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2016-1-5-26>
Polevoy A.N., Mykytiuk A.Yu. Modeling Emissions of CO₂, CH₄, NO, N₂O from Organic Soils (Peat-GHG-Model). *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling*. 2016;27(1):5–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2016-1-5-26>
21. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.Э., Шнырев Н.А. Абиотические факторы дыхания почв. *Экологический вестник Северного Кавказа*. 2010;6(1):5–13. URL: <http://ecokavkaz.ru/en/journal/2010/t-6-1> (дата обращения: 28.09.2024).
Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Sherba T.E., Shnyrev N.A. Abiotic Factors of Soil's Respiration. *The North Caucasus Ecological Herald*. 2010;6(1):5–13. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ecokavkaz.ru/en/journal/2010/t-6-1> (accessed 28.09.2024).
22. Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В. Прогнозирование выбросов парниковых газов в растениеводстве от уровня применяемых технологий. *АгроЭкоИнженерия*. 2024;(1):70–82. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82>
Dzhabbarov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V. Forecasting of Greenhouse Gas Emissions in Crop Production Depending on Applied Technology Level. *AgroEcoEngineering*. 2024;(1):70–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82>
23. Джаббаров Н.И., Семенова Г.А. Классификация критериев оценки экологической безопасности технических средств в растениеводстве. *АгроЭкоИнженерия*. 2022;(1):84–102. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-1110-84-102>
Dzhabbarov N.I., Semenova G.A. Classification of Criteria for Assessing the Environmental Friendliness of Machines and Equipment in Crop Production. *AgroEcoEngineering*. 2022;(1):84–102. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-1110-84-102>
24. Добринов А.В., Джаббаров Н.И., Сухопаров А.И. Показатели оценки эффективности и экологической безопасности технологий и технических средств производства продукции растениеводства. *АгроЭкоИнженерия*. 2022;(3):39–50. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-39-50>
Dobrinov A.V., Dzhabbarov N.I., Sukhoparov A.I. Indicators for Assessing the Efficiency and Environmental Safety of Technologies, Machines and Equipment for Crop Production. *AgroEcoEngineering*. 2022;(3):39–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-39-50>

25. Джаббаров Н.И., Захаров А.М., Жуйков И.И. Методика оценки и прогнозирования негативного влияния машинно-тракторных агрегатов на окружающую среду. *АгроЭкоИнженерия*. 2023;(2):82–97. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-82-96>
Dzhabbarov N.I., Zakharov A.M., Zhuykov I.I. Methodology for Assessing and Forecasting the Adverse Effect of Machine-Tractor Units on the Environment. *AgroEcoEngineering*. 2023;(2):82–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-82-96>
26. Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Захаров А.М., Добринов А.В. Методика оценки уровня выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024;18(3):75–81. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81>
Dzhabbarov N.I., Mishanov A.P., Zakharov A.M., Dobrinov A.M. Methodology for Assessing the Level of Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Crops Production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(3):75–81. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-3-75-81>

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, Филътровское 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, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Мишанов Алексей Петрович, 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, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9838-5508>, amishanov@mail.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.

А. В. Добринов – применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

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

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 20.01.2025; поступила после рецензирования 05.02.2025;
принята к публикации 14.02.2025*

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 (IEEP) 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 (IEEP) 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

Aleksei P. Mishanov, Senior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9838-5508>, amishanov@mail.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. Jabborov – controlling, leading and mentoring the process of planning and conducting the study; formulating the study idea, aims and objectives.

A. V. Dobrinov – using the statistical, mathematical, computational and other formal methods to analyze the study data; preparing the manuscript: writing a manuscript draft including its translation into a foreign language.

A. P. Mishanov – conducting the study, including carrying out experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and obtained data.

A. P. Savelyev – conducting the study process, including carrying out experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and obtained data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 20.01.2025; revised 05.02.2025; accepted 14.02.2025

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.333-354>EDN: <https://elibrary.ru/zgbejj>

УДК 621.3

Оригинальная статья / Original article

**Combination of Evolutionary Algorithms
and Direct Search Approaches for Improving
the Dynamic Performance of Grid Connected Solar
Power System****A. Verma^a , P. Tiwari^a, D. D. Sharma^b**^a *Madan Mohan Malaviya University of Technology,
Gorakhpur, India*^b *Mahatma Jyotiba Phule Rohilkhand University,
Bareilly, India* verma.amit546@gmail.com*Abstract*

Introduction. The Grid Connected Photovoltaic System comprises two fundamental control loops: an external loop responsible for overseeing the DC link voltage, and an internal control loop that regulates the inverter current. The primary element of any control loop is the proportional-integral controller and determining the appropriate gains for this controller is a difficult issue.

Aim of the Study. The study aimed to adjust the gains of the PI controllers in both static and dynamic irradiance scenarios for improving DC-link voltage by novel hybrid optimization method named Genetic Algorithm- Simulated Annealing and Genetic Algorithm- Pattern search.

Material and Methods. In this paper we use two hybrid optimizations techniques called Genetic Algorithm- simulated Annealing and Genetic Algorithm- Pattern Search to adjust the gains of the PI controllers in both static and dynamic irradiance scenarios for improving DC-link voltage.

Results. Finally, this study presents comparison of DC-link voltage with six cases with manual tuning of PI controller, as well as PI controller by Genetic Algorithm- simulated Annealing, Genetic Algorithm- Pattern Search, Genetic Algorithm, Simulated Annealing and Pattern Search. The comparison showed by using Genetic Algorithm-Simulated Annealing, peak overshoot in DC-link voltage is 829.3 V while peak overshoot in DC-link voltage is 1 052 V when DC-link voltage is controlled by manual tuning of PI as well as significant reduction in peak time and settling time in DC-link voltage.

Discussion and Conclusion. The results achieved to strengthen the DC-link voltage under both static and dynamic irradiance conditions enable the sustaining of a constant DC-link voltage, which is essential for grid-connected photovoltaic systems. The comparison showed by using Genetic Algorithm- Simulated Annealing, peak overshoot in DC-link voltage is 829.3 V while peak overshoot in DC-link voltage is 1 052 V when DC-link voltage is controlled by manual tuning of PI as well as significant reduction in peak time and settling time in DC-link voltage.

© Verma A., Tiwari P., Sharma D. D., 2025

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

Keywords: genetic algorithm, simulated annealing, pattern search, hybridized genetic algorithm and simulated annealing

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

For citation: Verma A., Tiwari P., Sharma D. D. Combination of Evolutionary Algorithms and Direct Search Approaches for Improving the Dynamic Performance of Grid Connected Solar Power System. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):333–354. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.333-354>

Сочетание эволюционных алгоритмов и методов прямого поиска для улучшения динамических характеристик солнечной энергетической системы, подключенной к сети

А. Верма¹✉, П. Тивари¹, Д. Д. Шарма²

¹ Технологический университет имени Мадана Мохана Малави,
г. Горакхпур, Индия

² Университет Махатмы Джотибы Пхуле Рохилкханд,
г. Барейли, Индия

✉ verma.amit546@gmail.com

Аннотация

Введение. Фотоэлектрическая система, подключенная к сети, состоит из двух основных контуров управления: внешнего контура, отвечающего за контроль напряжения в звене постоянного тока, и внутреннего контура управления, регулирующего напряжение инвертора. Основным элементом любого контура управления является пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор), но подбор соответствующих коэффициентов усиления этого регулятора является сложной задачей.

Цель исследования. Настроить коэффициенты усиления ПИ-регуляторов при статическом и динамическом облучении для улучшения напряжения в цепи постоянного тока с помощью двух гибридных методов оптимизации: «генетический алгоритм – искусственный отжиг» и «генетический алгоритм – поиск по шаблону».

Материалы и методы. Для настройки коэффициентов усиления ПИ-регуляторов при статическом и динамическом облучении для улучшения напряжения в цепи постоянного тока использовали два гибридных метода оптимизации: «генетический алгоритм – имитация отжига» и «генетический алгоритм – поиск по шаблону».

Результаты исследования. Сравнили напряжения в цепи постоянного тока в шести случаях использования ручной настройки ПИ-регулятора, при настройке ПИ-регулятора с помощью гибридных методов «генетический алгоритм – имитация отжига», «генетический алгоритм – поиск шаблонов», генетического алгоритма, «имитации отжига и поиска шаблонов». Сравнение показало, что при использовании гибридного метода «генетический алгоритм – имитация отжига» пиковое значение напряжения в цепи постоянного тока составляет 829,3 В, а при управлении напряжением в цепи постоянного тока с помощью ручной настройки пиковое превышение напряжения в цепи постоянного тока достигнет 1 052 В. ПИ, также наблюдается значительное уменьшение времени пикового напряжения и времени урегулирования напряжения в цепи постоянного тока.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты по усилению напряжения в цепи постоянного тока в условиях статического и динамического облучения позволяют поддерживать постоянное напряжение в цепи постоянного тока, что важно

для фотоэлектрических систем, подключенных к сети. Сравнение показало, что при использовании метода «генетический алгоритм – имитация отжига» пиковое превышение напряжения в цепи постоянного тока составляет 829,3 В, в это же время пиковое превышение напряжения в цепи постоянного тока при управлении напряжением в цепи постоянного тока с помощью ручной настройки составляет 1 052 В.

Ключевые слова: генетический алгоритм, искусственный отжиг, поиск по шаблону, гибридный метод «генетический алгоритм и имитация отжига»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Верма А., Тивари П., Шарма Д. Д. Сочетание эволюционных алгоритмов и методов прямого поиска для улучшения динамических характеристик солнечной энергетической системы, подключенной к сети. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(2):333–354. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.333-354>

Introduction. Oil, coal, natural gas, and nuclear power account for the considerable majority of the world energy needs, but they all have serious environmental consequences. One of the main causes of climate transformation is the greenhouse gas productions from burning fossil fuels, which is one of the most important crises facing people in this century [1]. Photovoltaic (PV) energy has gained a great deal of interest as a less polluting and noiseless resource with the potential to be utilized in rural areas [2]. Power electronics technology and digitization in the PV field have created it possible for PV applications to evolve quickly, especially Grid Connected Photovoltaic System (GCPS), which have grown from a few kW to over 100 MW [1]. The interface with the grid is now most crucial concerns for renewable energy penetration. Numerous control approaches are available in the literature, for photovoltaic (PV) interface systems with grid. However, it has difficulties with choosing the Proportional-Integral (PI) parameters correctly [3]. Trial and error method are employed to decide the PI controller parameters, which are mostly centered on the designer's expertise and experience. In most cases, this is not the optimal method for constructing a controller, so meta-heuristic algorithms, such as evolutionary or swarm intelligence techniques, are employed [4].

When we use hybridized optimization techniques in GCPS purpose to augment performance and reliability by merging dissimilar optimization algorithms.

Literature Review. In context with this, the Z Source Inverter (ZSI), that is based on the Seagull Optimization Algorithm (SOA), is exploited to increase active power by offsetting the requirement for reactive power in the GCPS structure. The suggested approach can be evaluated through traditional methods such as Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO) and Grey Wolf Optimization, correspondingly by [5]. In this paper, observer based robust double integral sliding mode controller for GCPS is presented and the controller parameters are optimized via the water evaporation optimization algorithm. The conclusions of this work are validated against those of GA and PSO optimized controllers, therefore confirming the superiority of the suggested controller over others by [6]. To proposes the decoupled active and reactive power with the Salp swarm optimization (SSO) technique to govern the grid connected inverters and the suggested SSO approaches is equated to established optimization methods such as PI controller, GA and PSO by [7]. In this study, the total harmonic distortion is optimized using a genetic algorithm for three-phase three, five, seven, and nine levels inverters with

varying switching angles and modulation index values by [8]. A two-loop study for grid-connected interleaved inverters with LCL filters is presented in this paper. The GA is used to optimize both the controller and the LCL filters in a dual-loop control approach by [9]

The author in [7] proposes the decoupled active and reactive power with the SSO technique to manage the grid connected inverters and the suggested SSO approaches is compared to established optimization methods such as PI controller, GA and PSO. However, detailed explanations of DC link voltage control and behavior of fitness function analysis of optimization techniques with iterations is ignored. The author in [8] the total harmonic distortion is optimized by a GA for three-phase three, five, seven, and nine levels inverters with varying switching angles and modulation index values, however, detailed explanations of fitness function analysis of GA algorithm is ignored.

In this paper GA, Pattern- Search, Simulated Annealing and combination of GA-PS and GA-SA algorithm is recommended to optimize the parameters of the PI controller and regulation of DCL voltage of the GCPS. The conclusions show that working with GA-SA and GA-PS offers optimal PI parameters that improve the dynamic performance of the GCPS compared to another methods. All the analysis is done on based by performance of DC link voltage, minimization of error in DCL voltage under normal and dynamic irradiance and behavior of various optimization techniques with number of iterations.

These key contributions are outlined in this paper summary:

1. The objective is to enhance the performance of the GCPS through the optimal tuning of the PI-based Voltage Regulator (VR) and Current Regulator (CR), which are determined by the GA-SA and GA-PS methods in both static and dynamic irradiance scenarios for improving DC-link voltage.
2. The hybrid optimization technique integrates both the GA-SA and the GA-PS. The suggested algorithm is verified and validated on a GCPS. Moreover, its outcomes are compared with those of the other frequently used techniques such as GA, SA, PS and PI without optimization centered on the uniform objective function to verify its accuracy and validity.
3. Comparative analysis of minimization of error in DCL voltage under variation of irradiance by using GA-SA and GA-PS methods.
4. Behavior of fitness function analysis of optimization techniques with iterations.

The residual divisions of this work are systematized as follows: The GCPS model is represented in Segment III. The discussion of the objective function of the optimization issue will be explored in Segment IV and brief description of hybrid optimization technique as well as block diagram of PI tuning by GA-SA, GA-PS, SA, PS, and GA. Section V comprises the several optimization techniques used in the paper and comparison of different optimization algorithms-based PI controller's gains. The end result is examined in Segment VI, and, lastly, the conclusions are withdrawn in Section VII.

System description. The system buildup of the GCPS is given in Figure 1. PV array, boost converter with MPPT module, inverter control, local loads, and grid make up the GCPS system.

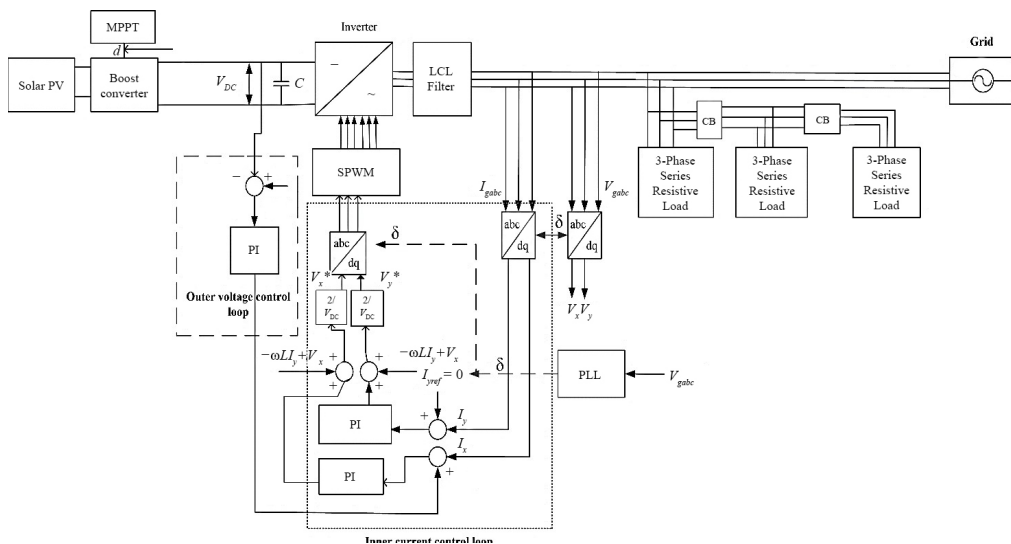


Fig. 1. GCPV system structure

Note: SPWM – sinusoidal pulse width modulation; PLL – phase locked loop; CB – circuit breaker.
Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [10].

The PV system, as explained in this study, primarily operates with a PV array including 47 parallel-connected branches. Each branch is composed of 10 PV modules, resulting in a peak power output of 100.2 kWp under solar radiation of 1 000 W/sqm. The boost converter raises DC voltage from approximate 295 V to 600 V. For inverter, 3-armed converter structure is used. The inverter control section is exploited to regulate the DC-link voltage and the required value of the inverter output. The MPPT is utilized to obtain the peak power point of the PV panels. The control scheme employed to the Inverter, as illustrated in Figure 1, primarily contains dual cascaded loops: an exterior voltage control loop that modulates the DCL voltage and a fast internal current control loop that controls the grid current. All control loops are primarily regulated by PI controllers, with their gains optimally determined through the application of GA-SA and GA-PS to enhance the dynamic performance of the GCPS. The inverter controller comprises of PLL, VR and CR shown in Figure 2. The assessment of voltage and currents takes place at the point of common connection. As a result, the original frame signals undergo a transformation into a synchronized orthogonal frame (d - q) that rotates at the angular frequency of the grid. The symbol δ signifies the rotating frame angle employed for the purpose of transferring voltages and currents from the original frame signal to the (d - q) frame, and vice versa. The V_x , V_y and I_x , I_y are voltages and currents in (d - q) frame is expressed by eqs. (1), (2):

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_0 \end{bmatrix} = 0.81 \begin{bmatrix} \cos \delta & \cos(\delta - 120^\circ) & \cos(\delta + 120^\circ) \\ -\sin \delta & -\sin(\delta - 120^\circ) & -\sin(\delta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_0 \end{bmatrix} = 0.81 \begin{bmatrix} \cos \delta & \cos(\delta - 120^\circ) & \cos(\delta + 120^\circ) \\ -\sin \delta & -\sin(\delta - 120^\circ) & -\sin(\delta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ga} \\ I_{gb} \\ I_{gc} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

V_{ga}, V_{gb}, V_{gc} and I_{ga}, I_{gb}, I_{gc} are the three-phase voltages and currents of the grid accordingly.

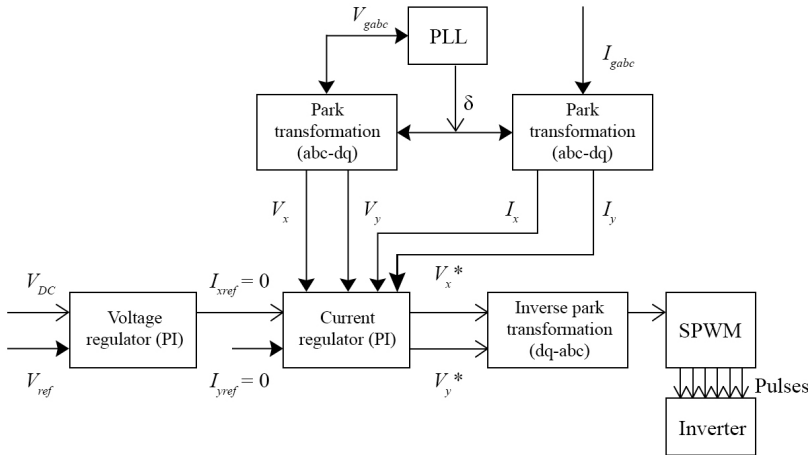


Fig. 2. Inverter control structure

Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [11].

Objective function. Numerous objective functions or fitness functions centered on error performance index are available, these criteria indices are Integral Squared Error, Integral Absolute Error, Integral Time-Weighted Absolute Error (ITAE) and Integral Time Square Error. In GCPS, assessment of optimal parameters of PI controllers of inverter control structure is very crucial. In this paper the ITAE based on error performance index is formulated as objective functions to be minimized for the VR and CR, with the purpose of achieve the optimal PI controller parameters (K_p and K_i) in the VR and CR [12]. The objective function of the system can be articulated as follows:

$$\min J(x) = \int_0^{T_{\max}} t |e(t)| dt, \quad (3)$$

$T_{\max}$ is the simulation time in seconds and the error signal is described as for voltage regulator and current regulator given below.

Error signal for voltage regulator is defined as $e_1(t)$ = Reference voltage-DC link voltage. Error signal for current regulator is defined as $e_2(t)$ = Reference current-measured current.

In the GCPS, the problem constraints consist of the optimized parameters of PI controllers, with bounds defined as follows:

$$l_b \leq K_p^{VR} \leq u_b;$$

$$l_b \leq K_i^{VR} \leq u_b;$$

$$l_b \leq K_p^{CR} \leq u_b;$$

$$l_b \leq K_i^{CR} \leq u_b,$$

where K_p^{VR} and K_p^{CR} are the proportional controllers gains of VR and CR respectively; K_i^{VR} , K_i^{CR} are the integral controllers gains of VR and CR, respectively; l_b and u_b are lower and upper bound respectively.

Hybrid optimization techniques. The performance of optimization techniques may vary for a given problem. In numerous instances, the utilization of hybrid techniques, using this difference, may yield superior results [13]. In this paper we use two hybrid optimizations techniques called GA-SA and GA-PS. Evolutionary algorithms, such as the genetic algorithm, are recognized as very resilient and potent global optimization methodologies employed to address complex problems characterized by multiple local optima. Nevertheless, these algorithms exhibit large computational demands and demonstrate suboptimal convergence performance. Conversely, SA and PS, when implemented as local search algorithms, can achieve convergence in a shorter amount of time; however, they do not possess a global perspective. The integration of global and local search algorithms presents the potential to harness the benefits of both optimization strategies while mitigating their respective drawbacks [14]. In GA-SA or GA-PS the result from GA is as the initial point for another optimization solver to execute a faster and more proficient local search.

Block diagram of PI tuning by various optimization techniques. The block diagram of the PI tuning by various optimization process is shown in below Figure 3. The choice of the optimization method by GA-SA, GA-PS, SA, PS, GA to determine the parameters (K_p and K_i).

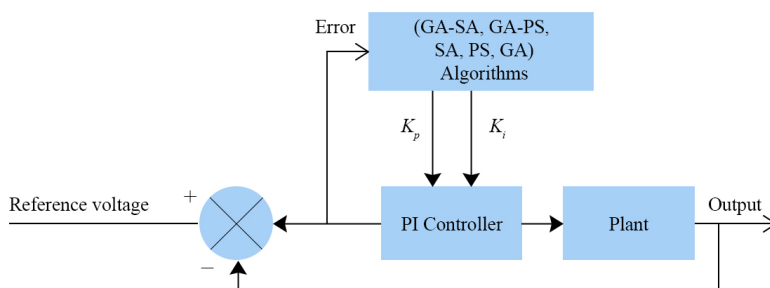


Fig. 3. PI tuning of various optimization techniques

Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [15].

Material and Methods. The optimization algorithm is a sequential procedure that commences with an arbitrary initialization and gradually approaches an optimal outcome through a series of iterations [12]. The primary objective of this study is to determine the

optimal parameters for PI controllers gain for both VR and CR in an inverter controller in GCPS by various optimization techniques illustrated given below.

Genetic Algorithm-Simulated Annealing (GA-SA). In this work, we have applied the GA and SA in hybrid manner to attain the optimum parameters for the PI controllers gain of VR and CR. In the context of optimization algorithms, the GA-SA framework is employed, where GA represents the global search component and SA denotes the local search component. The GA has the benefits of robust global optimization capability, quick speed, robust versatility, and simple implementation. Nevertheless, a notable limitation of this approach is its suboptimal performance in local search, leading to reduced search efficiency, particularly during the later stages of the optimization process. Conversely, the SA algorithm possesses proficient local search capabilities to compensate for the deficiencies of the GA [16]. The algorithms primarily consist of three key stages: initialization and population generation, iteration, termination and evaluation. Each algorithms share the same population generation [17]. The flow chart of GA-SA is shown in Figure 4.

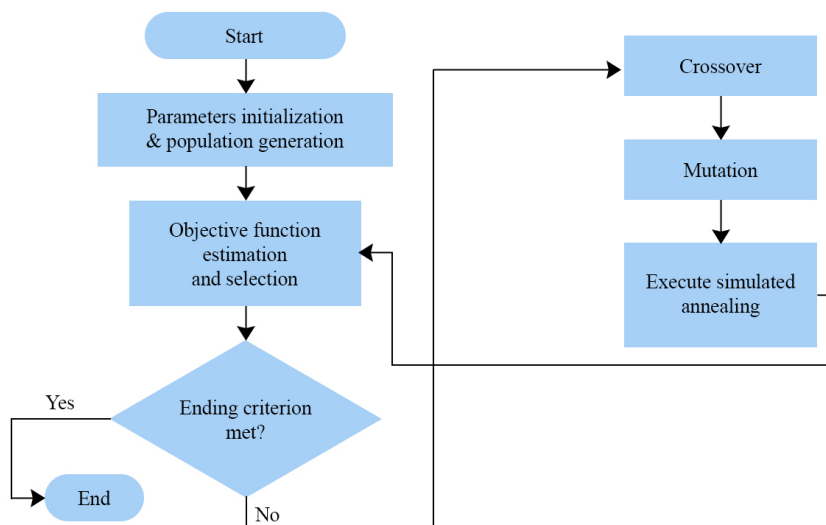


Fig. 4. The flow chart of GA-SA

Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [17].

Genetic Algorithm-Pattern Search (GA-PS). In GA-PS algorithm combines both GA and PS algorithm with the purpose of acquire the optimum parameters for the PI controllers gain of VR and CR. The GA serves as the primary optimization technique by using its ability to do global searches. Subsequently, the Pattern Search (PS) algorithm is utilized to refine the optimal solution obtained from GA throughout each evolutionary iteration [18]. The use of GA may result in a prolonged convergence process. In contrast, employing solely the PS algorithm would result in a solution that is highly unstable and susceptible to variations in beginning conditions. Hence, the integration of both algorithms yields outcomes that are more reliable and obtained with greater efficiency [19]. The flow chart of GA-PS is shown in Figure 5.

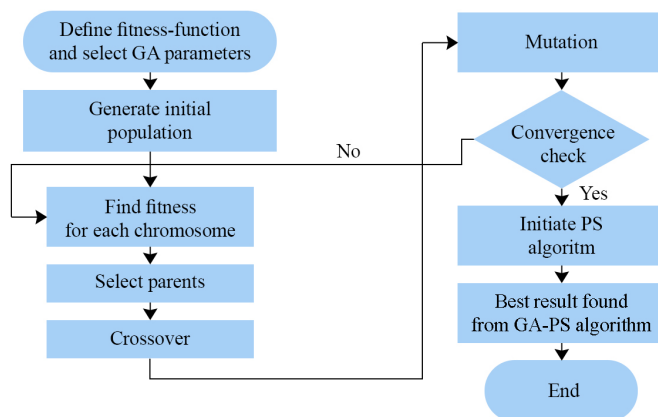


Fig. 5. The flow chart of GA-PS

Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [18].

Pattern search optimization techniques. PS algorithm to attain the optimum parameters for the PI controllers gain of VR and CR. The PS optimization technique is a derivative-free evolutionary approach as well as direct search method that is compatible for addressing a diverse range of optimization problems that fall beyond the boundaries of conventional optimization methods. In general, the PS optimization technique possesses the advantage of exhibiting a straightforward conceptual framework, facilitating ease of implementation and computational efficiency. In contrast to other heuristic algorithms, such as the GA, the PS algorithm offers a versatile and well-balanced operator that serves to improve and adjust both global and local search capabilities. The PS method operates by iteratively calculating a series of points that may or may not converge towards the ideal position [18]. The flow chart of PS is shown in Figure 6.

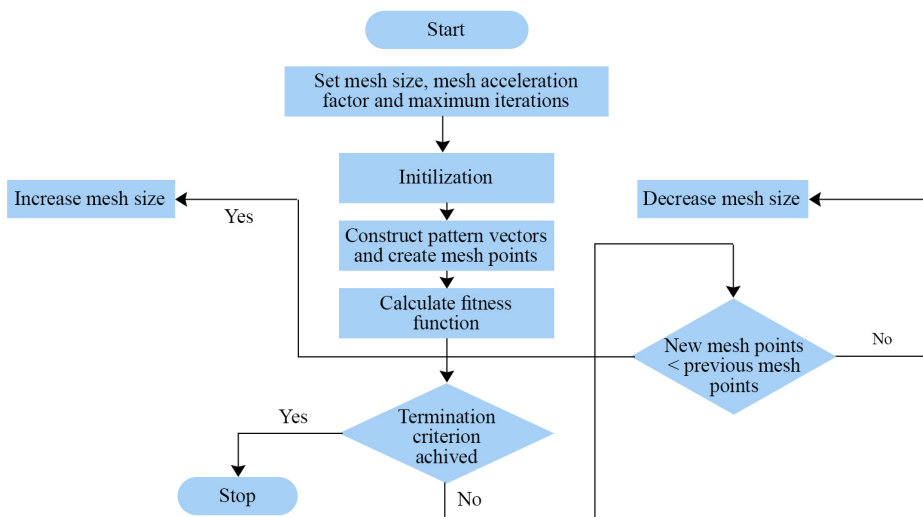


Fig. 6. Flow chart for Pattern search

Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [20].

Simulated Annealing. SA to attain the optimum parameters for the PI controllers gain of VR and CR. Simulated Annealing (SA) is a metaheuristic algorithm that is commonly used to search for the global optimum of a given function. This approach is mostly employed when prioritizing the identification of a satisfactory local optimal outcome over the attainment of an exact global optimal solution within a specified timeframe [21]. The concept of SA is based on an analogy to the physical annealing process. The flow chart of SA is shown in Figure 7.

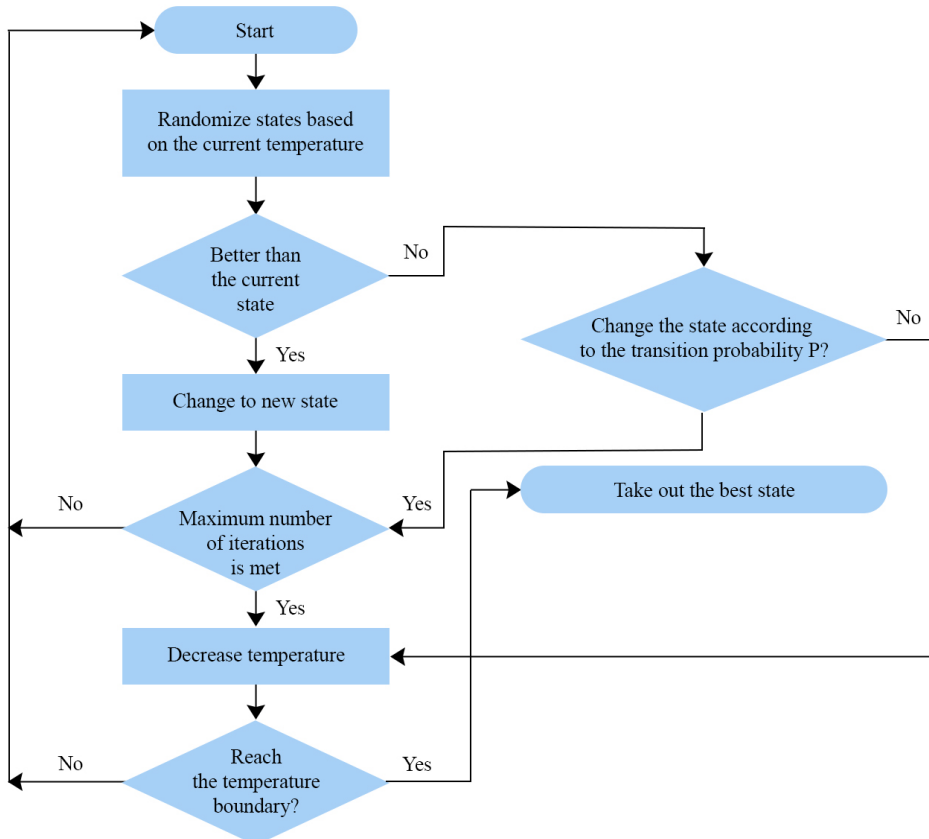
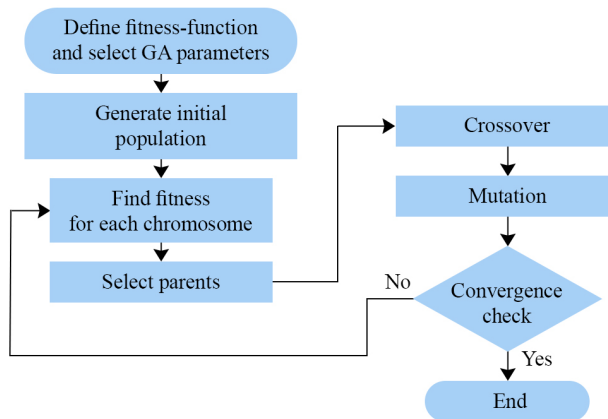


Fig. 7. Flow chart of Simulated annealing

Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [22].

Genetic Algorithm. GA algorithm to attain the optimum parameters for the PI controllers gain of VR and CR. The GA is an optimization technique inspired by genetic principles and natural selection. The GA enables a population of several individuals to evolve under defined selection criteria to a state that optimizes “fitness” (i.e., minimizes the cost function). The Genetic Algorithm commences, identical to any other optimization technique, by establishing the optimization variables, the cost function, and the associated costs [23]. The flow chart of GA is shown in Figure 8.



F i g. 8. Flow chart of genetic algorithm

Source: the diagram is compiled by the authors of the article from the materials [24].

Various optimization techniques-based PI controllers gains. In this subsection the attained PI controllers gains of various optimization techniques and without optimization are given which are listed in Table 1.

T a b l e 1

The attained PI controllers gains of various optimization techniques and without optimization

Approach	Voltage regulator		Current regulator	
	K_p	K_i	K_p	K_i
PI (Hit and trial)	0.00001	320	10	20
SA	0.90	14.56	60.56	63.42
PS	1	54	23	368
GA	1.16	13.78	103	303
GA-PS	1.16	12.78	100	397
GA-SA	1.16	10.78	79.01	390

Various optimization approaches parameters. In this subsection various optimization parameters like population size or search agents' number, number of iterations, lower and upper bound range of voltage and current regulator are given which are listed in Table 2.

T a b l e 2

Various optimization approaches parameters

Parameters	GA-SA	GA-PS	GA	PS	SA
Population size	25	25	25	Not applicable	Not applicable
Iterations	50	50	50	50	50
Range of PI gain voltage regulator	[0 400]	[0 400]	[0 400]	[0 400]	[0 400]
Range of PI gain current regulator	[0 400]	[0 400]	[0 400]	[0 400]	[0 400]

Results. This segment aims to demonstrate the dynamic performance of GCPV system using without optimization, and algorithms such as GA-SA, GA-PS, GA, PS, and SA. Additionally, it includes a comparative analysis of DC link voltage with and without optimization, the minimization of error in DC link voltage, and an analysis of optimization techniques centered on the number of iterations. The solar intensity is changed at $t = 0.1$ s from 1 000 W/sqm to 400 W/sqm to calculate the optimal setting of the PI controller gains.

PI tuning. This section is employed to illustrating the dynamic performance of the GCPV system when the PI parameters are achieved from the hit and trial method.

DCL voltage without PI optimization. Figure 9 shows that the DCL voltage from conventional PI controller, as can be seen maximum overshoot recorded is 1 052 V and settling time is 0.07 s.

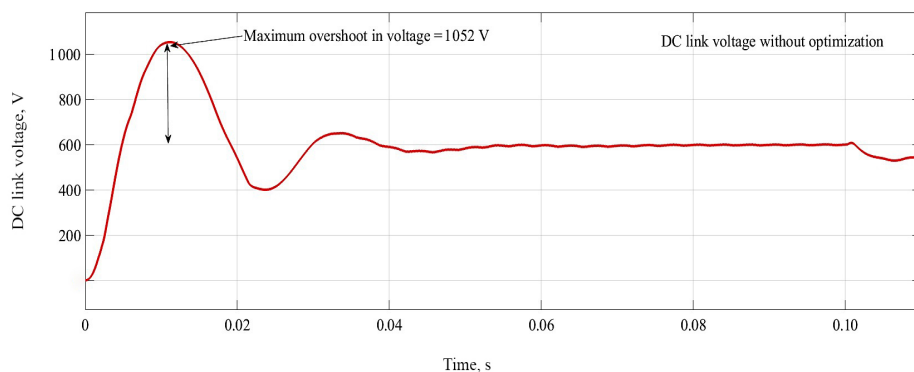


Fig. 9. DCL voltage without PI optimization

Source: hereinafter in this article the figures are made by the authors of the article with the use of the program Matlab Simulation.

Minimization of error in DCL voltage without optimization. At $t = 0.1$ s, the irradiance undergoes a dynamic change, transitioning from a 1 000 W/sqm to 400 W/sqm. As illustrated from below Figure 10 the errors reach around at $t = 0.1$ s is 50.57 V and settled after some time, this condition is not healthy for GCPV system. Figure 10 shows that the minimization of error in DCL without optimization.

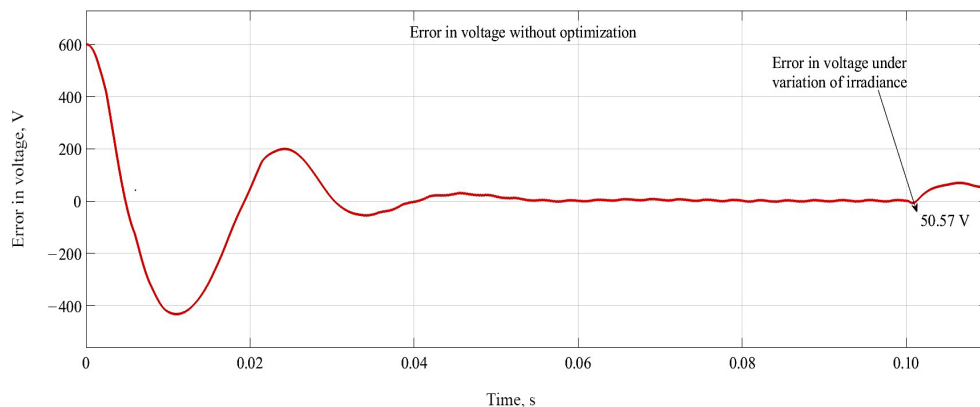
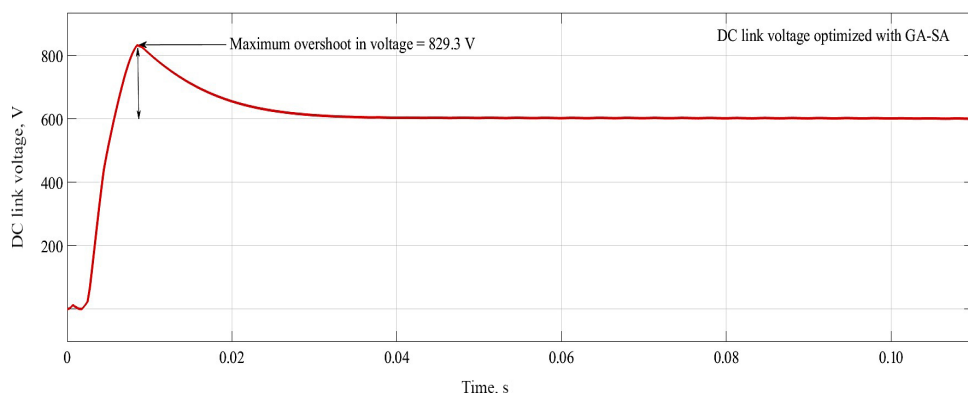


Fig. 10. Error in DCL voltage without PI optimization

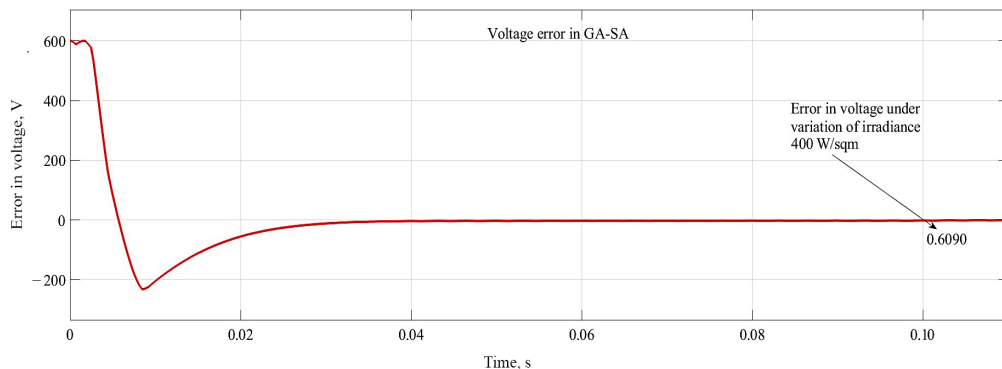
PI controller's optimization by GA-SA. The optimally measured values are 1.16 and 10.78 for K_p and K_i of the PI based VR, respectively as well as 79.01 and 390 for K_p and K_i of the PI based CR, respectively.

DC link voltage with GA-SA optimization. Figure 11 shows that the DCL voltage optid with GA-SA, as can be seen maximum overshoot in voltage recorded as 829.3 V and settling time is 0.037 s.



F i g. 11. DCL voltage optimized with GA-SA

Minimization of error in DCL voltage with GA-SA optimization. Solar insolation is varied as of 1 000 W/sqm to 400 W/sqm at $t = 0.1$ s. As illustrated from Figure 12 the errors reach around at $t = 0.1$ s is 0.6090 V very close to zero.



F i g. 12. Error in DCL voltage optimized with GA-SA

PI controller's optimization by GA-PS. The optimally measured values are 1.16 and 12.78 for K_p and K_i of the PI based VR, respectively as well as 100 and 397.7 for K_p and K_i of the PI based CR, respectively.

DC link voltage with GA-PS optimization. Figure 13 shows that the DCL voltage optimized with GA-PS, as can be seen maximum overshoot in voltage recorded as 830 V and settling time is 0.0371 s.

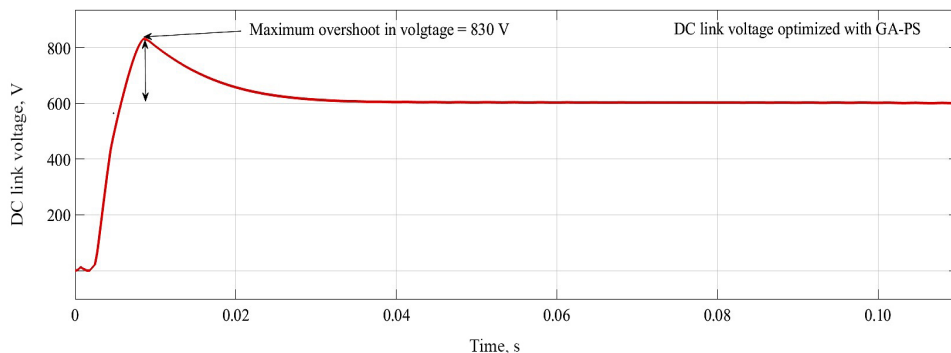


Fig. 13. DCL voltage optimized with GA-PS

Minimization of error in DCL voltage with GA-PS optimization. Solar insolation is varied as of 1 000 W/sqm to 400 W/sqm at $t = 0.1$ s. As illustrated from Figure 14 the errors reach around at $t = 0.1$ s is 0.6078 V very close to zero.

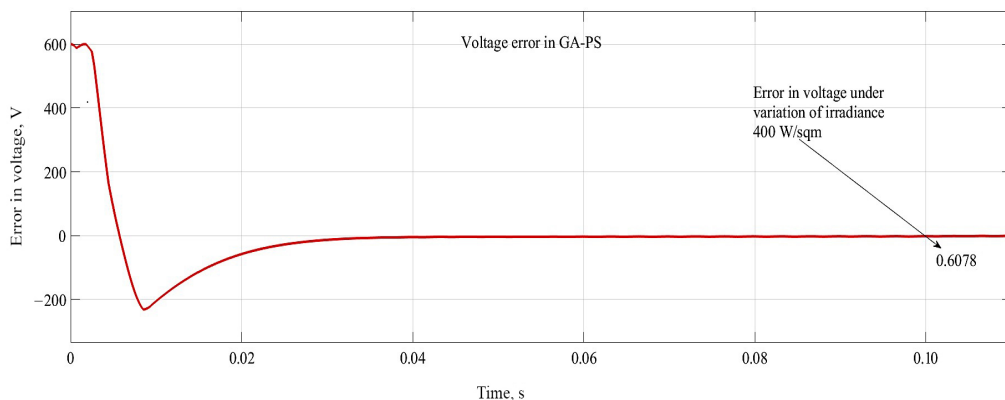


Fig. 14. Error in DCL voltage optimized with GA-PS

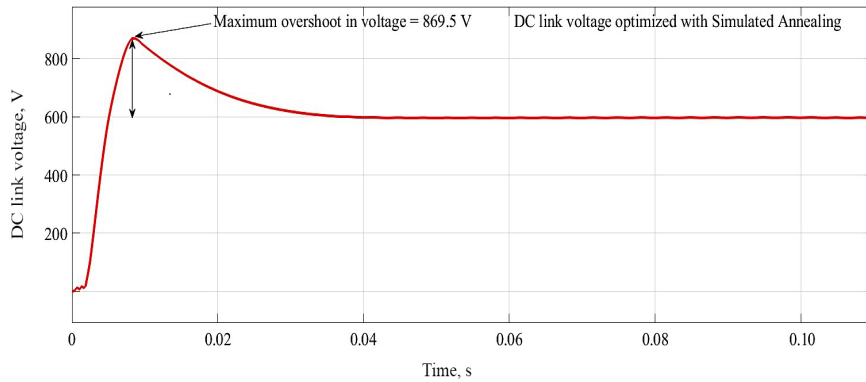
PI controller's optimization by simulated annealing technique. The optimally measured values are 0.90 and 14.56 for K_p and K_i of the PI based VR, respectively as well as 60.56 and 63.42 for K_p and K_i of the PI based CR, respectively.

DC link voltage with simulated annealing optimization. Figure 15 shows that the DCL voltage optimized with simulated annealing, as can be seen maximum overshoot in voltage recorded as 869.5 V and settling time is 0.039 s.

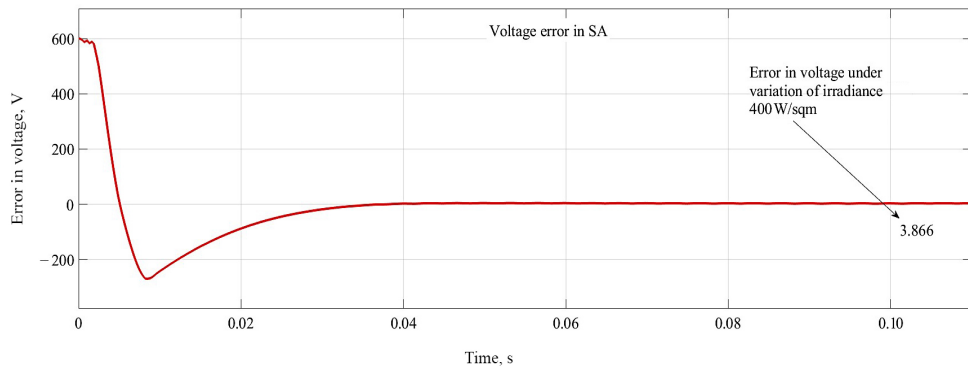
Minimization of error in DCL voltage with simulated annealing optimization. Solar insolation is varied as of 1 000 W/sqm to 400 W/sqm at $t = 0.1$ s. As illustrated from Figure 16 the errors reach around at $t = 0.1$ s is 3.866 V.

PI controller's optimization by pattern search technique. The optimally measured values are 1 and 54 for K_p and K_i of the PI based VR, respectively as well as 23 and 368 for K_p and K_i of the PI based CR, respectively.

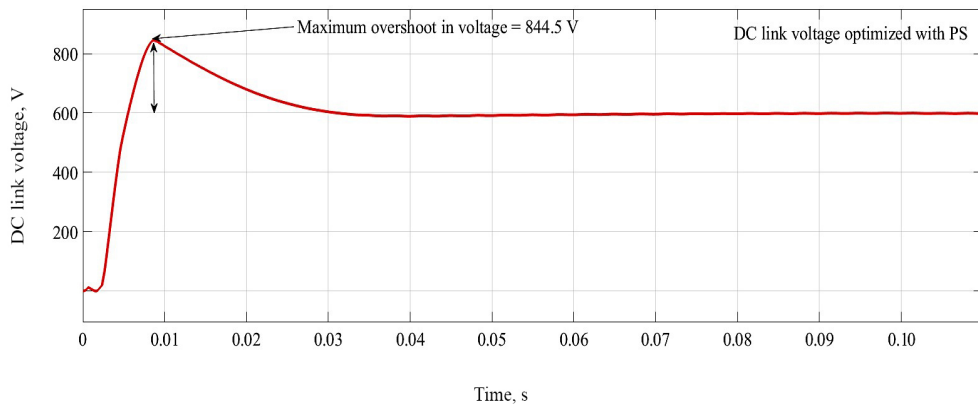
DC link voltage with pattern search optimization. Figure 17 shows that the DCL voltage optimized with pattern search, as can be seen maximum overshoot in voltage recorded as 844.5 V and settling time is 0.063 s.



F i g. 15. DCL voltage optimized with SA



F i g. 16. Error in DCL voltage optimized with SA



F i g. 17. DCL voltage optimized with PS

Minimization of error in DCL voltage with pattern search optimization. Solar insolation is varied as of 1 000 W/sqm to 400 W/sqm at $t = 0.1$ s. As illustrated from Figure 18 the errors reach around at $t = 0.1$ s is 1.643 V.

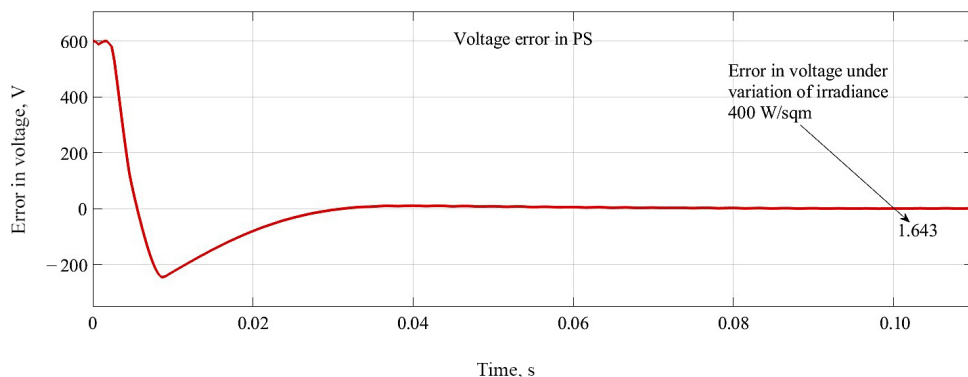


Fig. 18 Error in DCL voltage optimized with PS

PI controller's optimization by genetic algorithm technique. The optimally measured values are 1.16 and 13.78 for K_p and K_i of the PI based VR, respectively as well as 103 and 303 for K_p and K_i of the PI based CR, respectively.

DC link voltage with genetic algorithm optimization. Figure 19 shows that the DCL voltage optimized with genetic algorithm, as can be seen maximum overshoot in voltage recorded as 830 V and settling time is 0.03 s.

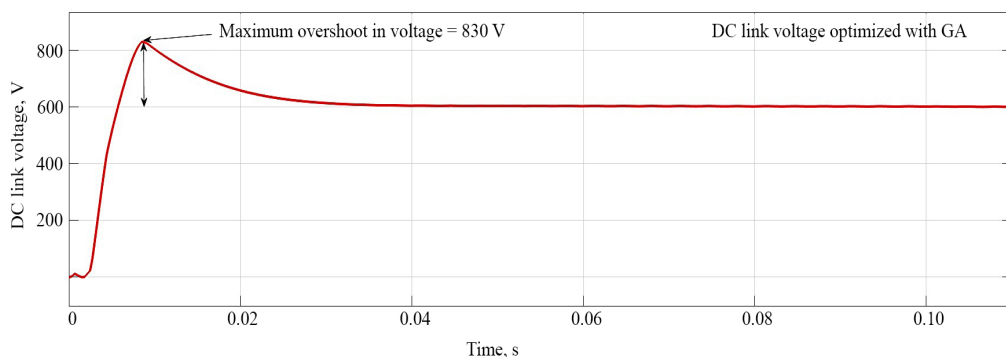


Fig. 19. DCL voltage optimized with GA

Minimization of error in DCL voltage with genetic algorithm optimization.

Solar insolation is varied as of 1 000 W/sqm to 400 W/sqm at $t = 0.1$ s. As illustrated from Figure 20 the errors reach around at $t = 0.1$ s is 0.6152 V.

Comparative analysis of DC link voltage based on optimization. A comparison of the GA-SA and GA-PS method with other renowned PI tuning methods examined in this paper was made for GCPV system on the basis of DC link voltage peak, rise time, peak time and settling time and the achieved results are illustrated in Table 3.

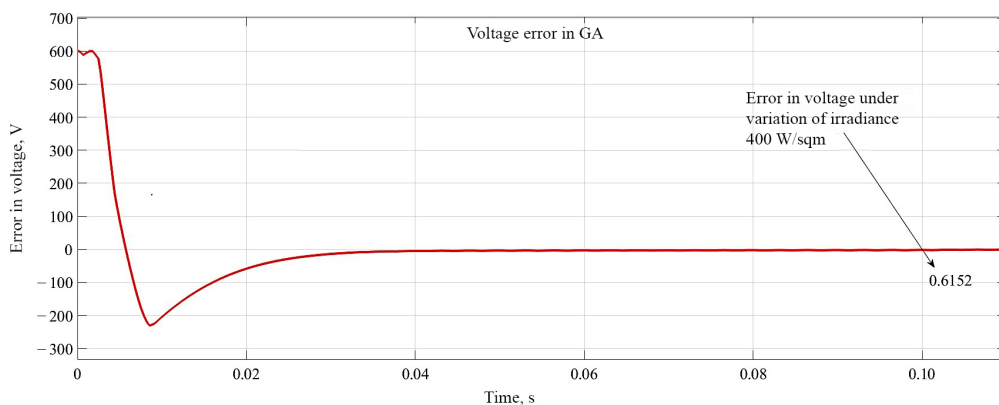


Fig. 20. Error in DCL voltage optimized with GA

Table 3

Comparative analysis of DC link voltage based on optimization

PI tuning	DC link voltage peak, V	Maximum overshoot in DC link voltage, %	Peak time t_p , s	Settling time t_s , s	Rise time t_r , s
PI	1 052	75.33	0.0110	0.080	0.0048
SA	869.5	44.90	0.0083	0.039	0.0050
PS	844.5	40.75	0.0086	0.060	0.0055
GA	830	38.33	0.0086	0.036	0.0057
GA-PS	830	38.33	0.0085	0.036	0.0057
GA-SA	829.3	38.21	0.0088	0.036	0.0057

It was concluded that the GA-SA, GA-PS and GA offers a enhanced solution for the PI gains optimal selection than other renowned algorithms in terms of transient response indicators, but GA-SA and GA-PS they have minimum fitness function value of convergence performance that's why GA-SA and GA-PS used in this paper. Convergence process of particular optimization explained in section 6.9. For example, the GA-SA, GA-PS and GA algorithm based on PI tuning provided 49%, 14.63% and 6.74% less overshoot than that of PI without optimization, SA and PS respectively. It can be also seen that the settling time, rise time and peak time of the GA-SA and GA-PS optimization methods is less than that of PI without optimization, SA and PS methods. Figure 21 shows the comparative analysis of DCL voltage with and without optimization.

Comparative analysis of minimization of error in DCL voltage under variation of irradiance. As illustrated from Figure 22 the errors reach around under variation of solar insolation from 1 000 W/sqm to 400 W/sqm at $t = 0.1$ s, for GA-SA optimization techniques the error in DCL voltage at variation of irradiance is 0.6090 V and for GA-PS is 0.6078 V as well when optimized by GA, SA and PS the error in voltage under variation of irradiance is 0.6152, 3.8660 and 1.6430 respectively. Clearly shows that when technique is hybridized the error in voltage is less under variation of irradiance.

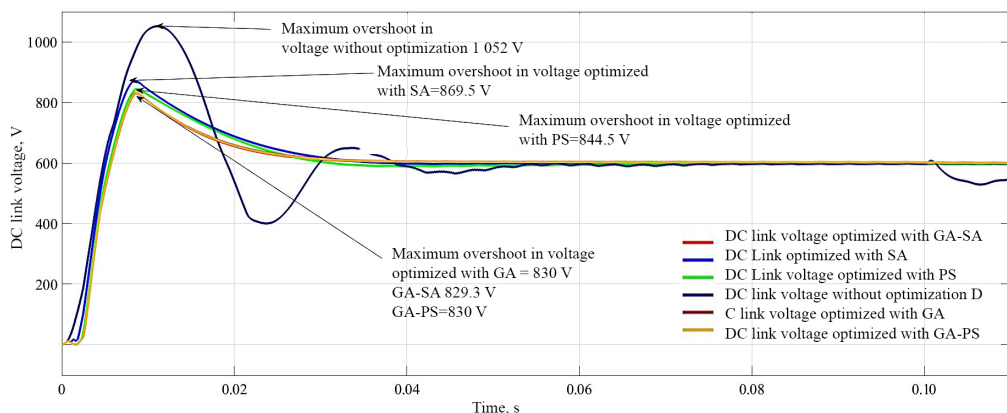


Fig. 21. Comparative analysis of DCL voltage with and without optimization

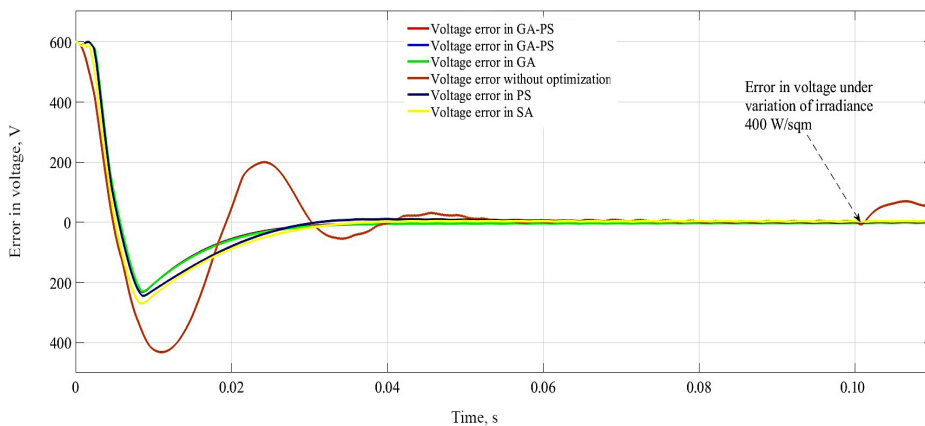


Fig. 22. Comparative analysis of error in DCL voltage with and without optimization

Behavior of various optimization techniques with number of iterations. Figure shows the convergence behavior of the suggested GA-SA and GA-PS in solving the minimization of error in voltage and current regulator for obtaining optimal PI parameters. It can be observed that the ITAE exhibited a decrease as the number of iterations increased. In addition, the ITAE serves as the fitness function, therefore minimizing ITAE leads to progress towards the optimal vicinity.

When evaluating a convergence curve in the optimization process, it is crucial to consider two key parameters: the convergence rate and the ultimate minimized or maximized value of the objective function. The first parameter determines the rate at which the convergence curve progresses, whereas the secondary parameter offers explicit insights on the value of the solution obtained through the optimization procedure. It is fairly clear in above figure that the GA-SA and GA-PS optimization techniques gets a suitable solution in minimizing the stated objective function with higher solution quality. The minimized value for the objective function for the GA-SA process is 0.267879857 and is obtained in the 32nd iteration of the simulation as well as the minimized value for

the fitness function for the GA-PS process is 0.259750701 and is obtained in the 48th iteration of the simulation.

It is obvious from above figure that the GA-SA and GA-PS based PI tuning method provided a better solution as compared to the GA, SA and PS based methods for the identical system and optimization parameters. Each algorithm was run 5 times to optimize the identical fitness function. The study aimed to minimise the defined objective function, and hence the lowest value achieved by each method was selected and depicted in the above figure. Increasing the number of iterations could potentially result in a further decrease in the value of the objective function. However, it is crucial to examine the trade-off between the reduction in the objective function and the time required for the optimisation process. Figure 23 shows the convergence curve of various optimization techniques as well as Figure 24 shows the objective function value of various optimization techniques.

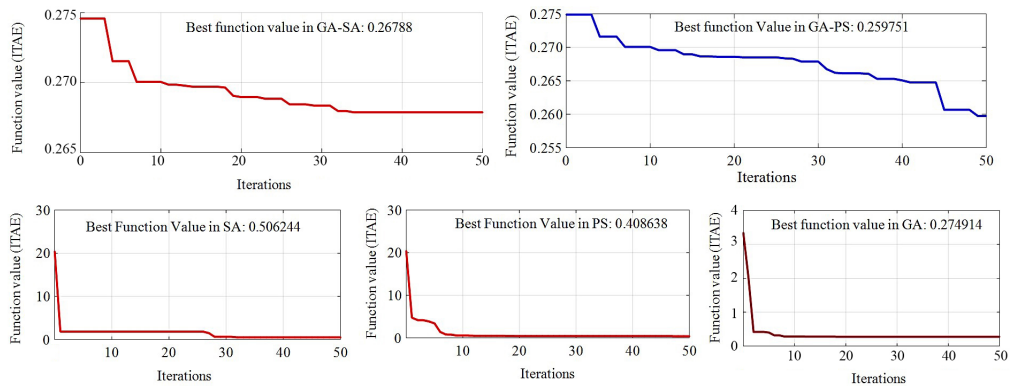


Fig. 23. Comparative analysis of convergence curve of various optimization techniques

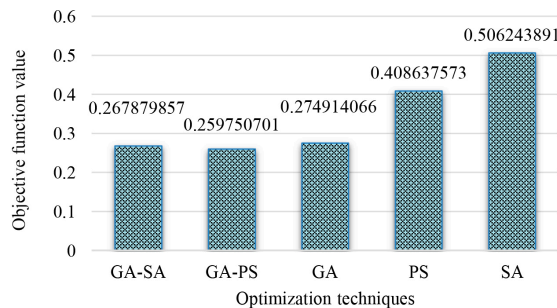


Fig. 24. Objective function value of various optimization techniques

Discussion and Conclusion. In this work, the DC link voltage regulation of the PV system is proposed. The regulation is achieved by optimizing the parameters of the PI controller. In this work, a new algorithm known as GA-SA and GA-PS is brought together to evaluate these parameters optimally. Optimization strategies yielded superior outcomes compared to manual calculations. In order to demonstrate the effectiveness of the adopted algorithm, its outcomes are evaluated against those of the formerly utilized

algorithms such as SA, PS and GA at the same objective function. As the aim of the study minimized value for the fitness function for the GA-SA process is 0.267879857 and is obtained in the 32nd iteration of the simulation as well as the minimized value for the fitness function for the GA-PS process is 0.259750701 and is obtained in the 48th iteration of the simulation. GA-SA and GA-PS proofs it's superior rather than GA, SA, PS based on minimization of fitness function. Characteristics of GA-SA, GA-PS and GA in settling time is same. With the help of hybrid optimization techniques optimizing power grid operations and energy distribution.

REFERENCES

1. Aouchiche N. Meta-Heuristic Optimization Algorithms Based Direct Current and DC Link Voltage Controllers for Three-Phase Grid Connected Photovoltaic Inverter. *Solar Energy*. 2020;207:683–692. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.086>
2. Zakzouk N.E., Abdelsalam A.K., Helal A.A., Williams B.W. PV Single-Phase Grid-Connected Converter: DC-Link Voltage Sensorless Prospective. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017;5(1):526–546. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2637000>
3. Attia M.A. Optimized Controllers for Enhancing Dynamic Performance of PV Interface System. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2018;5(1):1–10. <https://doi.org/10.1016/J.JESIT.2018.01.003>
4. Elazab O.S., Debouza M., Hasanien H.M., Muyeen S.M., Al-Durra A. Salp Swarm Algorithm-Based Optimal Control Scheme for LVRT Capability Improvement of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants: Design and Experimental Validation. *IET Renewable Power Generation*. 2020;14(4):591–599. <https://doi.org/10.1049/IET-RPG.2019.0726>
5. Kumar C.S., Puttamadappa C., Chandrashekar Y.L. Power Quality Enhancement in Grid-Connected PV Structure Using Z Source Inverter and Seagull Optimization Algorithm. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2640(1): 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0110515>
6. Pradhan R. Design of Observer-Based Robust Double Integral Sliding Mode Controller for Grid-Connected PV System. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023;1039:429–449. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2066-2_20
7. Vanaja N., Kumar N.S. Power Quality Enhancement Using Evolutionary Algorithms in Grid-Integrated PV Inverter. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2023;18:3615–3633. <https://doi.org/10.1007/S42835-023-01443-W>
8. Bouali Y., Imarazene K., Berkouk E.M. Total Harmonic Distortion Optimization of Multilevel Inverters Using Genetic Algorithm: Experimental Test on NPC Topology with Self-Balancing of Capacitors Voltage Using Multilevel DC–DC Converter. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023;(5). Available at: <https://www.springerprofessional.de/en/total-harmonic-distortion-optimization-of-multilevel-inverters-u/23507302> (accessed 29.10.2024).
9. Mateen A., Sarwar M., Hussain B., Abid M. Optimized Dual Loop Control Strategy for Grid-Connected Interleaved Inverters. 2022 19th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). 2022. <https://doi.org/10.1109/IBCAST54850.2022.9990109>
10. Roslan M.F., Al-Shetwi A.Q., Hannan M.A., Ker P.J., Zuhdi A.W.M. Particle Swarm Optimization Algorithm-Based PI Inverter Controller for a Grid-Connected PV System. *PLOS One*. 2020;16(10):e0243581. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0243581>
11. Essaghir S., Benchagra M., El Barbri N. Comparative Study of Three Phase Grid Connected Photovoltaic System Using PI, PR and Fuzzy Logic PI Controller with Harmonic Analysis. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020;624. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36475-5_5
12. Allam D., Mohamed H., Al-Gabalawy M., Eteiba M.B. Optimization of Voltage Source Inverter's Controllers Using Salp Swarm Algorithm in Grid Connected Photovoltaic System. 2019 21st

- International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008199>
13. Uslu M.F., Uslu S., Bulut F. An Adaptive Hybrid Approach: Combining Genetic Algorithm and ant Colony Optimization for Integrated Process Planning and Scheduling. *Applied Computing and Informatics*. 2022;18(1–2):101–112. <https://doi.org/10.1016/J.ACI.2018.12.002>
 14. Kelner V., Capitanescu F., Léonard O., Wehenkel L. A Hybrid Optimization Technique Coupling an Evolutionary and a Local Search Algorithm. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2008;215(2):448–456. <https://doi.org/10.1016/J.CAM.2006.03.048>
 15. Mousakazemi S.M.H. Comparison of the Error-Integral Performance Indexes in a GA-Tuned PID Controlling System of a PWR-Type Nuclear Reactor Point-Kinetics Model. *Progress in Nuclear Energy*. 2021;132:103604. <https://doi.org/10.1016/J.PNUCENE.2020.103604>
 16. Wei H., Li S., Jiang H., Hu J., Hu J. Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm for Improved Flow Shop Scheduling with Makespan Criterion. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2621. <https://doi.org/10.3390/APP8122621>
 17. Shahidul Islam M., Rafiqul Islam M. A Hybrid Framework Based on Genetic Algorithm and Simulated Annealing for RNA Structure Prediction with Pseudoknots. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022;34(3):912–922. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUCI.2020.03.005>
 18. Al-Othman A.K., Ahmed N.A., Alsharidah M.E., Almekhaizim H.A. A Hybrid Real Coded Genetic Algorithm – Pattern Search Approach for Selective Harmonic Elimination of PWM AC/AC Voltage Controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2013;44(1):123–133. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2012.07.034>
 19. Zhang Y.D., Wu L.N., Huo Y.K., Wang S.H. A Novel Global Optimization Method – Genetic Pattern Search. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;44–47:3240–3244. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.44-47.3240>
 20. Ali W., Li Y., Ahmed N., Ali W., Kashif M. A Novel Application of Pattern Search Algorithm for Efficient Estimation of Channel State Information in MIMO Network. *Wireless Personal Communication*. 2021;116:325–340. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07717-0>
 21. Pandey H.M., Rajput M., Mishra V. Performance Comparison of Pattern Search, Simulated Annealing, Genetic Algorithm and Jaya Algorithm. *Advances Intelligent Systems and Computing*. 2017;542:377–384. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3223-3_36
 22. Chen S.-M., Chien C.-Y. Solving the Traveling Salesman Problem Based on the Genetic Simulated Annealing ant Colony System with Particle Swarm Optimization Techniques. *Expert Systems with Applications*. 2011;38(12):14439–14450. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2011.04.163>
 23. Tammam M.A., Aboelela M.A.S., Moustafa M.A., Seif A.E.A. A Multi-Objective Genetic Algorithm Based PID Controller for Load Frequency Control of Power Systems. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013;3(12):463–467. Available at: <https://clck.ru/3M7EtT> (accessed 29.10.2024).
 24. Lambora A., Gupta K., Chopra K. Genetic Algorithm-A Literature Review. *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/COMITCON.2019.8862255>

About the authors:

Amit Verma, Research Scholar, Department of Electrical Engineering, Madan Mohan Malaviya University of Technology (Deoria Road, Gorakhpur 273016, India), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1591-1523>, verma.amit546@gmail.com

Prabhakar Tiwari, PhD., Professor, Department of Electrical Engineering, Madan Mohan Malaviya University of Technology (Deoria Road, Gorakhpur 273016, India), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3923-9126>, tiwarip6@gmail.com

Desh D. Sharma, PhD., Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Mahatma Jyotiba Phule Rohilkhand University (Pilibhit Bypass Road, Bareilly 243006, India), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4512-4878>, deshdeepak101@gmail.com

Contribution of the authors:

A. Verma – developing the study methodology, creating the models, preparing the manuscript: critical analysis of the manuscript and of comments and corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages.

P. Tiwari – developing the study methodology, creating the models, carrying out the study, including performing experiments or collecting evidence; preparing the manuscript: visualizing the study the findings and data obtained.

D. D. Sharma – formulating the study idea, aims and objectives, carrying out the study including performing experiments and collecting evidence.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 19.09.2024; revised 07.11.2024; accepted 15.11.2024

Об авторах:

Верма Амит, научный сотрудник факультета электротехники Технологического университета имени Мадана Мохана Малавия (273016, Индия, Горакхпур, Деория-роуд), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1591-1523>, verma.amit546@gmail.com

Тивари Прабхакар, доктор наук, профессор кафедры электротехники Технологического университета Мадан Мохан Малавия (273016, Индия, Горакхпур, Деория-роуд), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3923-9126>, tiwarip6@gmail.com

Шарма Дэш Дипак, доктор наук, доцент кафедры электротехники Технологического университета Махатмы Джотибы Пхуле Рохилкханд (243006, Индия, Барейли, Объездная дорога Пилибхит), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4512-4878>, deshdeepak101@gmail.com

Вклад авторов:

A. Верма – разработка и проектирование методологии исследования; создание моделей; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

P. Тивари – разработка и проектирование методологии исследования; создание моделей; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор доказательств; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

D. D. Шарма – формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 19.09.2024; поступила после рецензирования 07.11.2024;
принята к публикации 15.11.2024*

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

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

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.
2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction);
- 2) Цель статьи (Aim of the Article);
- 3) Материалы и методы (Materials and Methods);
- 4) Результаты исследования (Results);
- 5) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список литературы** (оформляется в соответствии с требованиями Ванкуверского стиля). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад авторов.** Для формулировки фактического вклада каждого соавтора в выполненную работу необходимо использовать таксономию CRediT (Contributor Roles Taxonomy) – стандарт, разработанный Национальной организацией по информационным стандартам (National Information Standards Organization, NISO) (<https://credit.niso.org/>). Порядок указания авторов и соавторов статьи согласуется ими самостоятельно. *Приводится на русском и английском языках.*

10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением BOAI открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Чаткин Михаил Николаевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-44-20.

Гордина Екатерина Павловна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

Engineering Technologies and Systems journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of 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. Levitsev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Mikhail N. Chatkin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254420.

Ekaterina P. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.



Редакторы – *М. А. Сульдина, С. Х. Зинина*
Перевод *Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. А. Климкиной*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 11.06.2025 г. Дата выхода в свет 30.06.2025 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 14,95.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 6508/1. Свободная цена.

Адрес типографии: 4603104, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д. 6,
пом. П1, каб. 59 (Типография ООО «Юникопи»).



Editors *M. A. Suldina, S. H. Zinina*
Translation *N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. A. Klimkina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.
Signed to print 11.06.2025. Date of publishing 30.06.2025.
Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$, Conventional printed sheets 14.95.

Number of copies 1 000. 1st edition – 100 copies. Order no. 6508/1. Free price.

Address of the Printing House: 1 Office, 59 Room, 6 Nartova St., Nizhny Novgorod 603104, Russian Federation (Printed by Unicopy LLC).