

doi: 10.15507/2658-4123.033.202302

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

Том 33, № 2. 2023

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

16+



Vol. 33, no. 2. 2023

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

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

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”

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),
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также EBSCO

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),
свидетельство 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. Огарёва», 2023

Инженерные технологии и системы

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 CrossCheck.

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)

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 и международного сообщества рецензентов Publons

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



Engineering Technologies and Systems

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 CrossCheck 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 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 and the international community of reviewers Publons

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сенин Пётр Васильевич – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

Левцев Алексей Павлович – *заместитель главного редактора*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», ORCID: 0000-0003-2429-6777, levtzevap@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Гордина Светлана Викторовна – *ответственный секретарь*, кандидат педагогических наук, ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – доктор биологических наук, академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет» (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 ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана», ORCID: 0000-0001-8675-1611 (Калуга, Российская Федерация)

Булгаков Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Российская Федерация); профессор строительного факультета Дрезденского технического университета, ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Дрезден, Германия)

Гербер Юрий Борисович – заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3224-6833 (Симферополь, Российская Федерация)

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

Димитров Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», ORCID: 0000-0003-1439-1674 (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Жачкин Сергей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ORCID: 0000-0002-1844-5011 (Воронеж, Российская Федерация)

Железникова Ольга Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, директор Института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (Саранск, Российская Федерация)

Игумнов Леонид Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», ORCID: 0000-0003-3035-0119 (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Истомина Наталья Леонидовна – доктор физико-математических наук, начальник отдела физических наук Российской академии наук, заместитель академика-секретаря по научно-организационной работе ОФН РАН; профессор кафедры управления инновациями ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»; главный редактор научно-технического журнала «Фотоника», ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Москва, Российская Федерация)

Кечемайкин Владимир Николаевич – кандидат экономических наук, доцент, директор Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», (Саранск, Российская Федерация)

Котин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», ORCID: 0000-0001-8235-0052 (Саранск, Российская Федерация)

Кусмарцев Фёдор 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 ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Пенза, Российская Федерация)

Лобачевский Яков Петрович – доктор технических наук, профессор, академик РАН, первый заместитель директора ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»; академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, ORCID: 0000-0001-7863-2962 (Москва, Российская Федерация)

Микаева Светлана Анатольевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», ORCID: 0000-0001-6992-455X (Москва, Российская Федерация)

Несмиян Андрей Юрьевич – доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе и инновациям Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской ГАУ», ORCID: 0000-0002-5556-1767 (Зерноград, Российская Федерация)

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», ORCID: 0000-0003-2927-768X (Тамбов, Российская Федерация)

Плотников Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ORCID: 0000-0002-8887-4591 (Киров, Российская Федерация)

Прытков Юрий Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоотехники им. профессора С. А. Лапшина ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (Саранск, Российская Федерация)

Рудик Феликс Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова», ORCID: 0000-0001-8444-0115 (Саратов, Российская Федерация)

Рябочкина Полина Анатольевна – доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», ORCID: 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: 0000-0003-0268-6539 (Каир, Египет)

Симдянкин Аркадий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева», ORCID: 0000-0001-9761-6183 (Рязань, Российская Федерация)

Скрябин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», ORCID: 0000-0001-7156-9198 (Пенза, Российская Федерация)

Тарасов Евгений Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», ORCID: 0000-0003-2717-7343 (Самара, Российская Федерация)

Фатыхов Юрий Адгамович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инжиниринга технологического оборудования Института агроинженерии и пищевых систем Калининградского государственного технического университета, ORCID: 0000-0002-8189-0433 (Калининград, Российская Федерация)

Федулова Лилия Вячеславовна – доктор технических наук, профессор РАН, заведующий экспериментальной клиникой лаборатории биологически активных веществ животного происхождения ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, ORCID: 0000-0003-3573-930X (Москва, Российская Федерация)

Шиселова Тамара Ильинична – доктор технических наук, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (Иркутск, Российская Федерация)

EDITORIAL BOARD

Petr V. Senin – *Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Engr.), Professor, First Vice-Rector, National Research Mordovia State University, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)

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

Svetlana V. Gordina – *Executive Editor*, Cand.Sci. (Ped.), ORCID: 0000-0003-2265-418X, 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. (Engr.), Professor of the Chair of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, ORCID: 0000-0001-8675-1611 (Kaluga, Russian Federation)

Alexey G. Bulgakov – Dr.Sci. (Engr.), 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: 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: 0000-0002-4110-2199 (Zhenjiang, China)

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

Yury A. Fatykhov – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Process Equipment Engineering of Institute of Agricultural Engineering and Food Systems, Kaliningrad State Technical University, ORCID: 0000-0002-8189-0433 (Kaliningrad, Russian Federation)

Liliya V. Fedulova – Dr.Sci. (Engr.), 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: 0000-0003-3573-930X (Moscow, Russian Federation)

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

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

Natalia L. Istomina – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia, ORCID: 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. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, ORCID: 0000-0001-8235-0052 (Saransk, Russian Federation)

- Oleg N. Kukharev** – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Rector of Penza State Agrarian University, ORCID: [0000-0002-3519-4066](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. (Engr.), Professor, First Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of RAS, Academician of RAS, ORCID: [0000-0001-7863-2962](https://orcid.org/0000-0001-7863-2962) (Moscow, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electronics, MIREA – Russian Technological University, ORCID: [0000-0001-6992-455X](https://orcid.org/0000-0001-6992-455X) (Moscow, Russian Federation)
- Andrey Yu. Nesmiyan** – Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Deputy Director for Research and Innovation, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, ORCID: [0000-0002-5556-1767](https://orcid.org/0000-0002-5556-1767) (Zernograd, Russian Federation)
- Valeriy V. Ostrikov** – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Laboratory for the Use of Lubricants and Processed Oil Products, All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, ORCID: [0000-0003-2927-768X](https://orcid.org/0000-0003-2927-768X) (Tambov, Russian Federation)
- Sergey A. Plotnikov** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University, ORCID: [0000-0002-8887-4591](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. (Engr.), Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University, ORCID: [0000-0001-8444-0115](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: [0000-0001-8503-8486](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: [0000-0003-0268-6539](https://orcid.org/0000-0003-0268-6539) (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)
- Arkadii A. Simdiankin** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University, ORCID: [0000-0001-9761-6183](https://orcid.org/0000-0001-9761-6183) (Ryazan, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, ORCID: [0000-0001-7156-9198](https://orcid.org/0000-0001-7156-9198) (Penza, Russian Federation)
- Evgeniy M. Tarasov** – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University, ORCID: [0000-0003-2717-7343](https://orcid.org/0000-0003-2717-7343) (Samara, Russian Federation)
- Sergey Yu. Zhachkin** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Automated Equipment for Machine Building Production, Voronezh State Technical University, ORCID: [0000-0002-1844-5011](https://orcid.org/0000-0002-1844-5011) (Voronezh, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Director of the Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)



СОДЕРЖАНИЕ

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

- Труфляк Е. В., Хуснетдинов В. Е.** Модель перемещения опрыскивателя для обработки
тростника рисовой оросительной системы 154
- Джабборов Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П.** Моделирование процесса
обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте 175

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Сафин Ф. Р., Баширов Р. М., Неговора А. В., Корабельников С. К., Раков Н. В.**
Оперативный контроль мощностных показателей дизельных двигателей с топливной системой
типа Common Rail 192
- Пеньков Н. А., Жачкин С. Ю., Завражнов А. И.** Определение границ изменения
внешних параметров, усложняющих расчет подвески сельскохозяйственной техники 207

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Ожерельев В. Н., Никитин В. В.** Совершенствование конструкции дисковой бороны
для ягодников 219
- Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А.** Анализ эффективности технологии
разделения навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции 237
- Шемякин А. В., Фадеев И. В., Успенский И. А., Юхин И. А., Чаткин М. Н.** Состав
для противокоррозийной обработки деталей резьбовых соединений 256

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

- Мифтахов Э. Н., Мустафина С. А., Насыров И. Ш., Морозкин Н. Д.** Алгоритм
оценки молекулярных характеристик полимерного продукта в условиях многоточечного
регулирования 270
- Информация для авторов и читателей* 288

CONTENTS

AGRICULTURAL ENGINEERING

Truflyak E. V., Khusnetdinov V. E. A Sprayer Movement Model for Treating Reeds in Rice Irrigation System	154
Jabborov N. I., Dobrinov A. V., Saveluev A. P. Modeling of the Tillage Process by the Method of Stress Concentration in the Tilled Layer	175

MECHANICAL ENGINEERING

Safin F. R., Bashirov R. M., Negovora A. V., Korabelnikov S. K., Rakov N. V. Operational Control of Power Indicators of Diesel Engines with Common Rail Fuel System	192
Penkov N. A., Zhachkin S. Yu., Zavrazhnov A. I. Determination of the Boundaries of Changes in External Parameters that Complicate the Calculation of the Suspension of Agricultural Machinery	207

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Ozherelev V. N., Nikitin V. V. Improving the Design of the Disc Harrow for Berry Plantations	219
Shalavina E. V., Vasilev E. V., Papushin E. A. Analysis of Manure Separation Technology Efficiency into Fractions Followed by Liquid Fraction Rectification	237
Shemyakin A. V., Fadeev I. V., Uspensky I. A., Yukhin I. A., Chatkin M. N. Composition for Anticorrosive Treatment of Parts of Threaded Connections	256

INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

Miftakhov E. N., Mustafina S. A., Nasyrov I. Sh., Morozkin N. D. Algorithm for Evaluation of the Molecular Characteristics of a Polymer Product under Conditions of Multipoint Control	270
Information for Authors and Readers of the Journal	288

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 635-134:633.584.4

doi: 10.15507/2658-4123.033.202302.154-174

Оригинальная статья



Модель перемещения опрыскивателя для обработки тростника рисовой оросительной системы

Е. В. Труфляк , В. Е. Хуснетдинов*Кубанский государственный аграрный университет
(г. Краснодар, Российская Федерация)* truffliak@mail.ru

Аннотация

Введение. Рисоводство – важная отрасль растениеводства для экономики Кубани, производящей около 80 % российского риса. Одним из существенных факторов, снижающих урожайность данной культуры, является наличие высокостебельных сорняков, растущих в каналах и на валиках рисового чека. Проблема состоит в отсутствии конструктивно-технологической схемы опрыскивателя для защиты рисовой оросительной системы от тростника, обеспечивающего локальную обработку его метелок. При обработке сорняка по периметру рисового чека агрегат находится под воздействием возмущений, которые возникают из-за неровностей рельефа чека. Данные возмущения вызывают колебания штанги в вертикальном и горизонтальном направлениях, что оказывает негативное влияние на качество обработки метелок тростника.

Цель статьи. Повышение эффективности защиты рисовых чеков от тростника путем обоснования конструктивно-технологической схемы опрыскивателя для локальной обработки метелок и модели его перемещения с учетом рельефа рисового чека. **Материалы и методы.** В теоретических исследованиях использовались положения математики и теоретической механики. Экспериментальные исследования проводились на рисовых оросительных системах Красноармейского района Краснодарского края с использованием планирования эксперимента.

Результаты исследования. Предложена конструктивно-технологическая схема опрыскивателя с правосторонней штангой, выполненная по форме размещения верхних точек тростника $y = 310,84x^{0,0955}$, находящегося в канале чека. На основании модели перемещения опрыскивателя диапазон изменения положения штанги отличается от регулируемого значения по вспашке – 3,1 %; стерне риса – 1,4 %; рапсу – 0,6 %; чистому пару – 2,3 %; озимой пшенице – 1,4 %.

Обсуждение и заключение. Полученные данные показывают незначительное отличие изменения колебаний штанги предлагаемого опрыскивателя от регулируемого значения, что положительно влияет на качество и точность обработки метелок. Представленные в статье результаты могут быть использованы для серийного производства опрыскивателей, позволяющих выполнять обработку высокостебельных сорняков рисовой оросительной системы и высокорослых культур.

© Труфляк Е. В., Хуснетдинов В. Е., 2023

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

Ключевые слова: опрыскиватель, тростник, камыш, штанга, модель, рисовая оросительная система

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Труфляк Е. В., Хуснетдинов В. Е. Модель перемещения опрыскивателя для обработки тростника рисовой оросительной системы // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 154–174. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.154-174>

Original article

A Sprayer Movement Model for Treating Reeds in Rice Irrigation System

E. V. Truflyak , V. E. Khusnetdinov

Kuban State Agrarian University (Krasnodar, Russian Federation)

 truflyak@mail.ru

Abstract

Introduction. Rice growing is an important branch of crop sector in Kuban, which produces about 80% of Russian rice. One of the significant factors reducing the yield of this crop is the presence of high-stemmed weeds growing in the canals and on the rollers of the rice paddy fields. The problem is the lack of structural and technological scheme for the sprayer to protect the rice irrigation system from the reeds providing local treatment of their panicles. When treating the weeds that are on the perimeter of the rice paddy field, the unit is under the influence of disturbances that arise from the unevenness of the relief of the field. These disturbances cause oscillation of the boom in the vertical and horizontal directions, which has a negative impact on the quality of processing the reed panicles.

Aim of the Article. The work is aimed at increasing the efficiency of rice paddy fields protection from the reeds by substantiating the design and technological scheme of the sprayer for local treatment of the reed panicles and the model of the sprayer movement according the relief of the rice cheek.

Materials and Methods. In theoretical studies, the mathematics and theoretical mechanics methods were used. Experimental studies were conducted on rice irrigation systems of Krasnoarmeiskiy district of Krasnodar region using planning experiments.

Results. The design and technological scheme of the sprayer with a right-handed boom, formed according the placement of the reed upper points $y = 310,84x^{0,0955}$, located in the channel of the paddy field is proposed. Based on the sprayer movement model, the range of boom position variation differs from the regulated value for plowing – 3.1 %; rice stubble – 1.4 %; rape – 0.6 %; clean fallow – 2.3 %; winter wheat – 1.4 %.

Discussion and Conclusion. The obtained data show an insignificant difference in the variation of boom oscillation of the proposed sprayer from the adjustment value, which positively affects the quality and accuracy of treating reed panicles. The obtained results can be used for serial production of sprayers for treating high-stemmed weeds in rice irrigation system and high-growing crops.

Keywords: sprayer, cane, reed, boom, model, rice irrigation system

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

For citation: Truflyak E.V., Khusnetdinov V.E. A Sprayer Movement Model for Treating Reeds in Rice Irrigation System. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):154–174. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.154-174>

Введение

Рисоводство в России имеет довольно короткую историю – порядка 90 лет. В рисовой системе одной из серьезных проблем, влияющих на рост, развитие и урожайность риса, являются сорняки, среди которых наиболее распространены тростник, рогоз, клубнекамыш и др. Борьба с сорняками агротехническими методами малоэффективна из-за сложности их проведения на больших площадях – на Кубани около 69 540 чековых сооружений и 19 317 км чековых валиков (по данным Федерального научного центра риса). Использование авиационных методов гербицидной обработки чековых валиков приводит к высокому расходу химиката, попадающего не только на метелку, но и само растение, его корневую систему, в воду, из-за чего сносится далеко от места обработки. Это ведет к необратимым экологическим последствиям для человека и природы.

Актуальным вопросом при возделывании риса является повышение эффективности защиты чековых сооружений от тростника путем снижения расхода ядохимикатов и использования нового способа локальной обработки метелок тростника. Предлагаемый способ возделывания риса предусматривает защиту от сорной растительности, основанный на экономических порогах вредоносности путем целенаправленной обработки его метелок. Проблема состоит в отсутствии конструктивно-технологической схемы опрыскивателя для защиты рисовых чеков от тростника, обеспечивающего локальную обработку метелок и модели его перемещения с учетом рельефа рисового чека.

Цель работы – повышение эффективности защиты рисовых чеков от тростника путем обоснования конструктивно-технологической схемы опрыскивателя метелок и модели его перемещения с учетом рельефа рисового чека.

Обзор литературы

Химический метод защиты рисовой оросительной системы является эффективным, но вредным для экосистемы. Модернизацией штанговых опрыскивателей для обработки высокостебельных культур занимались многие ученые. Так, Ю. С. Афасижевым предложена конструктивно-технологическая схема штангового опрыскивателя для горного и предгорного садоводства. Конструкция позволяет проводить обработку деревьев одновременно по периметру и высоте [1]. В свою очередь, И. Г. Смирновым представлен садовый высококлиренсный опрыскиватель-гербицидник для обработки в междурядьях, обоснован алгоритм расчета параметров штангового садового опрыскивателя для внесения ядохимикатов [2]. Также проведены теоретические исследования по выбору типа форсунок, обоснованию их высоты расположения. Данное решение при дополнительном переоборудовании может быть использовано и в рисоводстве.

Г. Г. Масловым и С. М. Борисовой рассматривались вопросы эффективной обработки пневматическими щелевыми распылителями для садоводства и полевых культур с использованием ультрамалообъемной обработки [3]. Крымские ученые провели исследование воздушно-жидкостного потока, создаваемого камерным опрыскивателем при химической защите виноградных насаждений, и предложили математическую модель воздушно-жидкостного потока применительно к виноградникам. Данные исследования могут быть применены для обработки метелок тростника с использованием защитного устройства для снижения потерь пестицидов [4].

Российские ученые изучили работу распылителей штанговых опрыскивателей, которые могут быть использованы для обработки метелок тростника [5]. Применение воздушного потока для уменьшения сноса капель при обработке

тростника является эффективным способом, но трудным для реализации на практике [6]. Одним из перспективных направлений повышения эффективности и уменьшения потерь является применение способов дифференцированного опрыскивания, позволяющего изменять нормы расхода распылителей или секций, описанных в зарубежных работах [7; 8]. Дифференцированная обработка метелок затруднительна в связи с высокой хаотичностью и частотой их расположения.

Дифференцированное внесение пестицидов рассмотрено и в современных работах агроинженерного центра ВИМ, в том числе с использованием беспилотного вертолета, различных роботизированных систем и платформ [9–11]. Применение большинства из них в рисоводстве затруднено из-за условий использования, отсутствия связи с биометрическими показателями элементов оросительной системы и растений тростника.

Е. В. Петровской изучено повышение равномерности распределения жидкости штангой опрыскивателя и предложены уравнения, определяющие смещение штанги при различном рельефе поля [12].

При выполнении технологической операции опрыскивания агрегат, состоящий из трактора и опрыскивателя, находится под внешним воздействием возмущений, зависящих от рельефа соответствующего поля. Данные возмущения вызывают колебания штанги в вертикальном и горизонтальном направлениях, что негативно влияет на качество обработки культуры. В работах П. М. Василенко рассмотрено воздействие таких сил на машинно-тракторный агрегат [13–15].

Исследователями представлены показатели, влияющие на технологический процесс перемещения трактора с опрыскивателем в рисовой оросительной

системе: уравнение движения агрегата; схема внешних сил на трактор и сельскохозяйственную машину при движении; способы движения агрегатов; основные кинематические характеристики агрегата и участка [16; 17]. Рядом авторов проводились исследования сил, действующих на различные сельскохозяйственные машины при выполнении технологических операций, устойчивости хода широкозахватными агрегатами [18; 19].

Представленные выше методики могут быть использованы при моделировании процесса перемещения агрегата по рисовой оросительной системе.

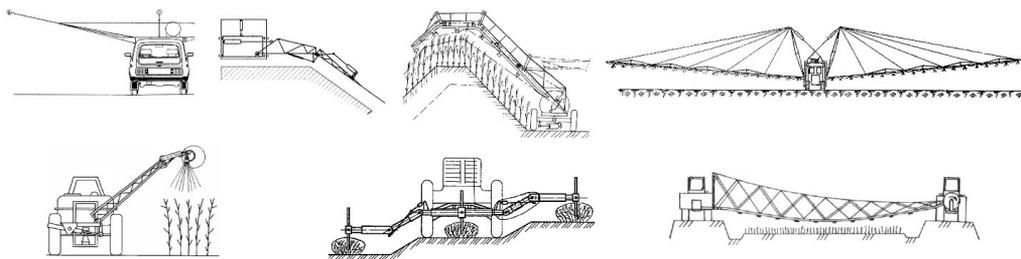
Нами выполнен обзор результатов интеллектуальной деятельности: патентов на изобретения и полезные модели, авторских свидетельств. На сайте Федерального института промышленной собственности по международной патентной классификации МПК А01М 7/00 «Жидкостные опрыскиватели» проанализированы 843 патента на изобретения с 1923 по 2022 г., 117 патентов на полезные модели с 1994 по 2022 г. В результате выбраны наиболее близкие к предлагаемому решению аналоги.

Некоторые штанговые опрыскиватели предназначены для обработки высокорослых культур, дамб, уклонов, мелиоративных каналов (рис. 1). Они могут быть использованы и для обработки тростника с большими потерями гербицидов и нанесением вреда оружающей природе.

Решений для локальной обработки метелок тростника, произрастающего в рисовой оросительной системе, нами не найдено.

На основании выполненного патентного обзора по решениям, близким к предлагаемому, для локальной обработки метелок тростника в каналах рисовых чеков можно заметить следующие недостатки:

– не предназначены для обработки метелок тростника;



Р и с. 1. Схемы результатов интеллектуальной деятельности:
 верхний ряд слева направо – № 67402 [20], 1815 [21], 94030568 [22], 180921 [23];
 нижний ряд – № 9344 [24], 1158137 [25], 13260 [26]

F i g. 1. Diagrams of the intellectual activity results:
 top row from left to right – No. 67402 [20], 1815 [21], 94030568 [22], 180921 [23];
 bottom row – No. 9344 [24], 1158137 [25], 13260 [26]

– не обеспечивают локальную обработку метелок, раствор может попадать на землю;

– отсутствует связь конструкции штанги с размерными характеристиками метелок и стебля тростника;

– не обеспечивают обработку тростника по ширине канала.

Далее выполнен обзор выпускаемых промышленностью решений. На основании изученного материала [27] предлагаемое решение относится по назначению к специальному; расходу рабочей жидкости – полнообъемному и малообъемному; типу распылительно-распределительного устройства – штанговому (гидравлическому); виду привода – прицепному (рис. 2).

Анализ 75 протоколов испытаний опрыскивателей на машиноиспытательных станциях Поволжская и Сибирская (с 2000 г.), Владимирская (с 2003 г.), Алтайская и Северо-Кавказская (с 2009 г.), Кубанская (с 2011 г.), Кировская (с 2012 г.), Подольская (с 2018 г.), Северо-Западная (с 2018 г.) позволил выбрать возможные решения для обработки тростника в рисовой оросительной системе [28]. Для анализа использовался открытый доступ документов, размещенных на официальных сайтах станций.

Для удовлетворительной обработки тростника из проанализированных

опрыскивателей можно выделить: Туман-3 – регулировка штанги во высоте до 2,7 м [29]; Amazone UX 6200 – 2,5 м [30]; Berthoud raptor 4240 – 3,01 м [31]; Maestria 21-39 – 2,65 м [32] (рис. 3).

Материалы и методы

Нами представлен новый способ локальной обработки метелок тростника рисовой оросительной системы опрыскивателем ОП-2000 с новой конструкцией штанги в определенный период вегетации растения [33; 34]. Предложена конструктивно-технологическая схема опрыскивателя с правосторонней штангой, выполненная по форме расположения верхних точек метелок тростника на ширине канала.

При обработке метелок тростника особое внимание уделяется точности обработки, на которую оказывают влияние в том числе и колебания штанги в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это возникает из-за неровностей рельефа чека, который может быть с различным агрофоном в момент обработки (вспашка, дискование, стерня риса, рапс, чистый пар, озимая пшеница и др.).

Объектом исследования выступает технологический процесс перемещения опрыскивателя по рельефу рисового чека и обработки метелок тростника пестицидом.



Р и с. 2. Классификация опрыскивателей
F i g. 2. Classification of sprayers



Р и с. 3. Опрыскиватели слева направо:
Туман-3; Amazone UX 6200; Berthoud raptor 4240; Maestria 21-39

F i g. 3. Sprayers from left to right:
Tuman-3; Amazone UX 6200; Berthoud raptor 4240; Maestria 21-39

В теоретических исследованиях использовались положения математики и теоретической механики.

Экспериментальные исследования проводились на рисовой оросительной системе Красноармейского района Краснодарского края с применением статистических измерений и методов планирования эксперимента.

Расстояние между колесами опрыскивателя ОП-2000 регулируется ($B_m = 1,4; 1,6; 1,8$ м), поэтому для измерений использовалась рейка (рис. 4) с данными значениями расстояний. Проводились измерения в 5 рисовых чеках (агрофон: вспашка, стерня риса, рапс, чистый пар, озимая пшеница – рис. 5) на каждом поле по периметру в месте перемещения опрыскивателя (рис. 6).

Рейка ложилась в месте движения опрыскивателя перпендикулярно каналу, далее производился замер по вертикали от рейки до почвы в точках 0; 1,4; 1,6; 1,8 м (рис. 7).

Погрешность измерений учитывалась выбраковкой несущественных значений с использованием методики полевого опыта Б. А. Доспехова.

Результаты исследования

При обработке тростника, находящегося по периметру рисового чека, агрегат находится под воздействием возмущений, которые возникают из-за неровностей рельефа чека $Z_m(t)$ [9]. Данные возмущения вызывают колебания штанги в вертикальном и горизонтальном направлениях, что негативно влияет на качество обработки метелок тростника.

Расстояние от поверхности рисового чека до распылителей является выходной функцией $h_i(t)$.

Внутренние входные параметры опрыскивателя: l_m – длина «точка прицепа – опора колеса»; l_H – длина «точка опоры колеса – штанга»; B_m – колея опрыскивателя; $l_{пр}$ – длина штанги.

Принимаем векторы внутренних входных параметров $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, внешних $\bar{F} = \{f_1, f_2 \dots f_k\}$. Вектор выходных параметров (реакция на входные возмущения) $\bar{y} = \{y_1, y_2 \dots y_m\}$.

Математическая модель:

$$\bar{F} \xrightarrow{A(\bar{x})} \bar{y}, \quad (1)$$

где A – оператор системы, который зависит от входных внутренних параметров.

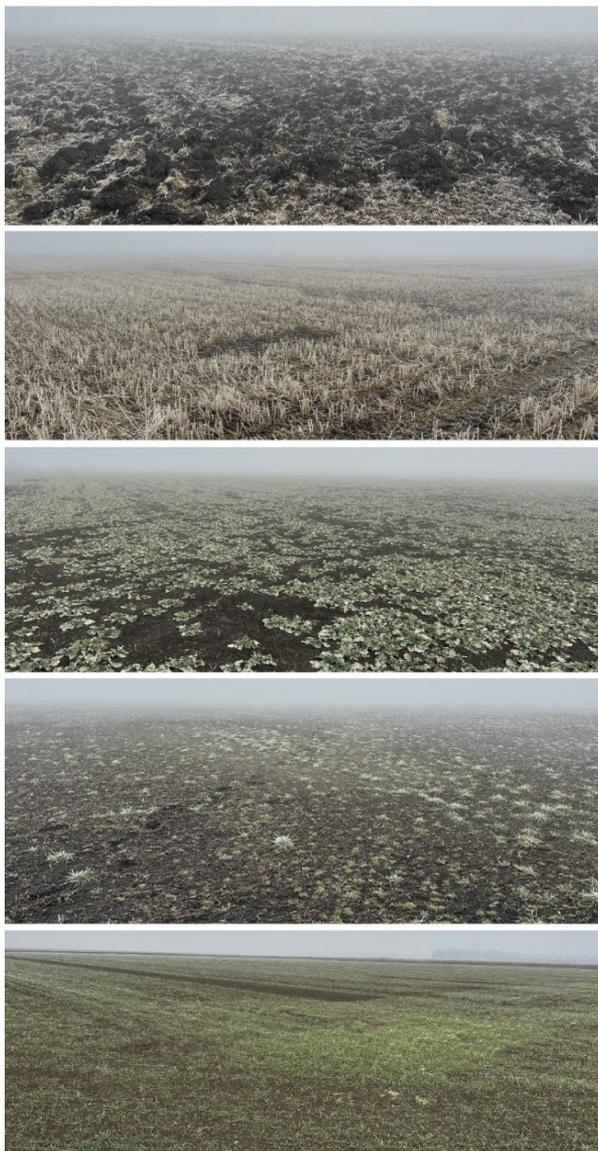
Рассмотрим расчетную схему агрегата в вертикальной плоскости с учетом продольного расположения (рис. 8).

При движении опрыскивателя по поверхности рисового чека трактор перемещается по оси Z на $Z_{тр}(t)$ и совершает угловые колебания $\varphi_{тр}(t)$. На основании этих данных можно получить колебание точки крепления прицепа $Z_o(t)$. При этом колебания опрыскивателя в вертикальной плоскости с учетом продольного расположения $\varphi_m(t)$.

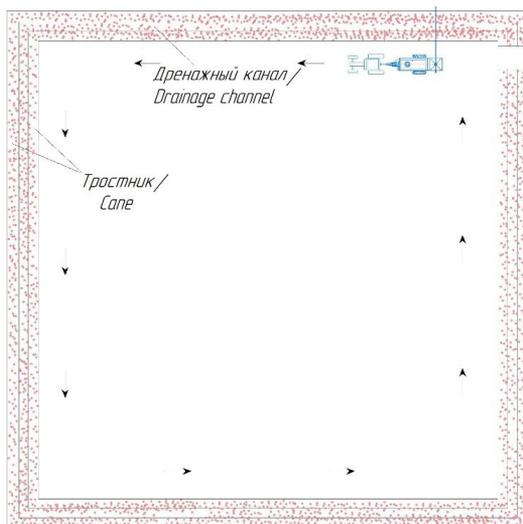
Расчетная схема агрегата в вертикальной плоскости с учетом поперечного расположения представлена на рисунке 9. На схеме колебания в вертикальной плоскости с учетом поперечного расположения $\psi_m(t)$.



Р и с. 4. Измерительная рейка
F i g. 4. Measuring rail



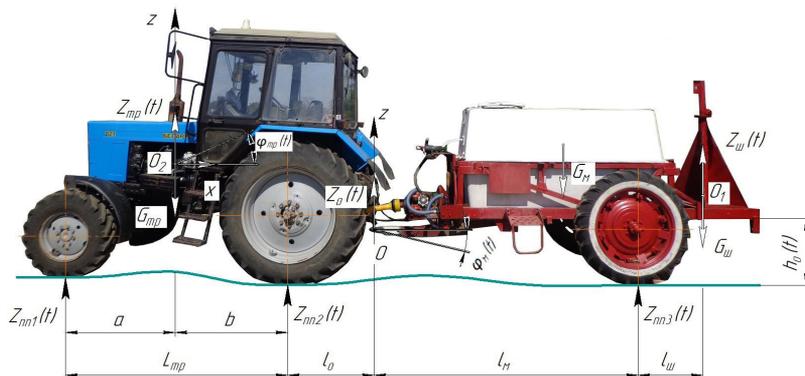
Р и с. 5. Агрофон сверху вниз: вспашка; стерня риса; рапс; чистый пар; озимая пшеница
F i g. 5. Agrophon from top to bottom: plowing; rice stubble; rape; clean fallow; winter wheat



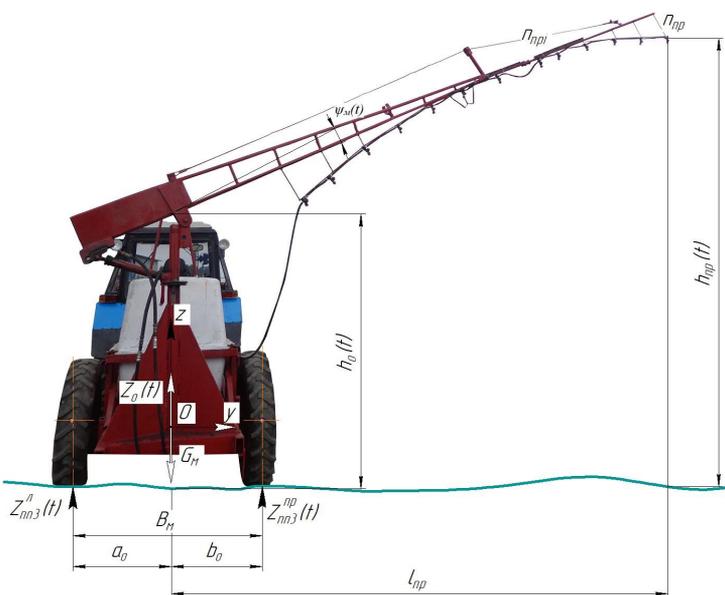
Р и с. 6. Способ перемещения опрыскивателя в рисовом чеке
 F i g. 6. Method of moving the sprayer in the rice paddy field



Р и с. 7. Измерение рельефа в точках последовательно справа налево:
 0; 1,4; 1,6; 1,8 м по агрофону сверху вниз: вспашка; стерня риса; рапс; чистый пар; озимая пшеница
 F i g. 7. Terrain measurement at points successively from right to left:
 0; 1.4; 1.6; 1.8 m by agrophonus from top to bottom: plowing; rice stubble; rape; clean fallow; winter wheat



Р и с. 8. Схема агрегата в вертикальной плоскости с учетом продольного расположения
F i g. 8. Schematic diagram of the unit in the vertical plane, taking into account the longitudinal arrangement



Р и с. 9. Схема агрегата в вертикальной плоскости с учетом поперечного расположения
F i g. 9. Schematic diagram of the unit in the vertical plane, taking into account the transverse arrangement

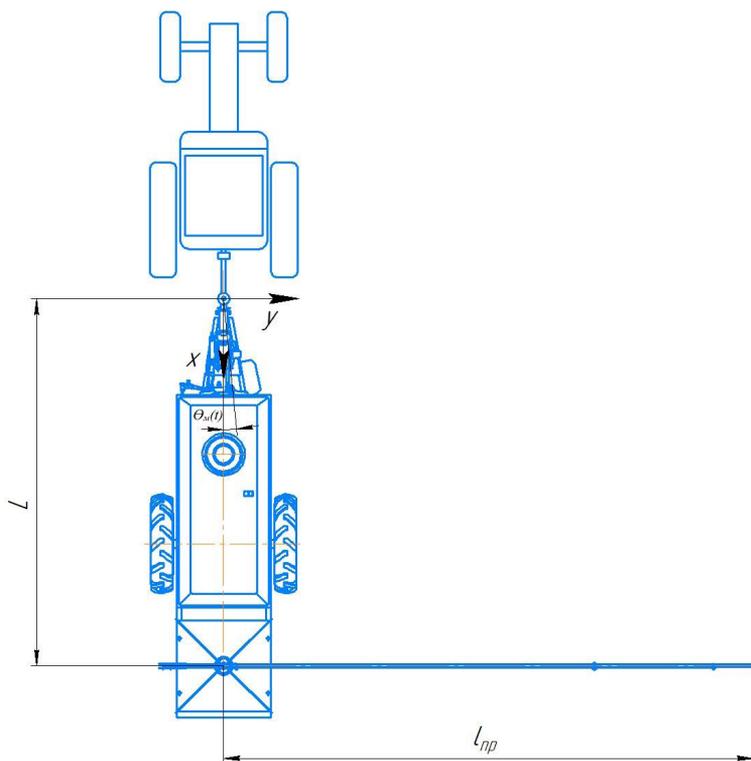
Расчетная схема агрегата в горизонтальной плоскости показана на рисунке 10. На данной схеме колебания в горизонтальной плоскости – $\Theta_m(t)$.

Перемещение трактора по оси Z (рис. 8):

$$Z_{\text{тр}}(t) = \frac{Z_{\text{оп1}}(t)b + Z_{\text{оп2}}(t)a}{L_{\text{тр}}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{оп1}}(t)$ – рельеф рисового чека под передними колесами, м; $Z_{\text{оп2}}(t)$ – рельеф рисового чека под задними колесами, м; a, b – длины по горизонтали «ось передних и задних колес – центр тяжести трактора» соответственно, м; $L_{\text{тр}}$ – длина «ось передних – задних колес», м.

Колебания трактора в угловой плоскости:



Р и с. 10. Схема агрегата в горизонтальной плоскости
 F i g. 10. Schematic diagram of the unit in the horizontal plane

$$\varphi_{\text{тр}}(t) = \frac{Z_{\text{nn1}}(t) - Z_{\text{nn2}}(t)}{L_{\text{тр}}} \quad (3)$$

Перемещение точки прицепа:

$$\begin{aligned} Z_o(t) &= Z_{\text{тр}}(t) + l_o \varphi_{\text{тр}}(t) = \\ &= \frac{Z_{\text{nn1}}(t)b + Z_{\text{nn2}}(t)a}{L_{\text{тр}}} + \\ &+ l_o \left(\frac{Z_{\text{nn1}}(t) - Z_{\text{nn2}}(t)}{L_{\text{тр}}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Колебания опрыскивателя в вертикальной плоскости с учетом продольного расположения:

$$\varphi_{\text{м}}(t) = \frac{Z_o(t) - Z_{\text{nn3}}^o(t)}{l_{\text{м}}}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{nn3}}^o(t)$ – средний рельеф рисового чека, находящийся под колесами опрыскивателя, м; $l_{\text{м}}$ – длина «точка прицепа – опора колеса», м.

По расчетной схеме рисунка 9:

$$Z_{\text{nn3}}^o(t) = \frac{Z_{\text{nn3}}^{\text{л}}(t)b_o + Z_{\text{nn3}}^{\text{п}}(t)a_o}{B_{\text{м}}}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{nn3}}^{\text{л}}(t)$, $Z_{\text{nn3}}^{\text{п}}(t)$ – рельеф рисового чека соответственно под левым и правым колесами опрыскивателя, м; a_o , b_o – длина «левое, правое колесо – центр тяжести опрыскивателя»; $B_{\text{м}}$ – колея опрыскивателя, м.

Так как $a_o = b_o = B_{\text{м}} / 2$, то:

$$Z_{\text{nn3}}^o(t) = \frac{Z_{\text{nn3}}^{\text{л}}(t) + Z_{\text{nn3}}^{\text{п}}(t)}{2}. \quad (7)$$

При этом по схеме рисунка 8 величина колебаний O_1 :

$$\begin{aligned} Z_{ш}(t) &= Z_o(t) + \varphi_m(t)l_{ш} = \\ &= \frac{Z_{nn1}(t)b + Z_{nn2}(t)a}{L_{тр}} + \\ &+ l_o \left(\frac{Z_{nn1}(t) - Z_{nn2}(t)}{L_{тр}} \right) + \\ &+ \left(\frac{Z_o(t) - Z_{nn3}^o(t)}{l_M} \right) l_{ш}. \end{aligned} \quad (8)$$

Траектория перемещения левого края штанги:

$$h_o(t) = h_{oC}(t) + Z_{ш}(t), \quad (9)$$

где h_{oC} – установленная высота штанги.

Колебания в вертикальной плоскости с учетом поперечного расположения:

$$\psi_m(t) = \frac{Z_{nn3}^л(t) - Z_{nn3}^{np}(t)}{B_M}. \quad (10)$$

Расстояние от распылителя до поверхности рисового чека:

$$\begin{aligned} h_{npi}(t) &= h_o(t) - \psi_m l_{npi} = \\ &= h_{oy}(t) + Z_{ш}(t) - \\ &- \left(\frac{Z_{nn3}^л(t) - Z_{nn3}^{np}(t)}{B_M} \right) l_{npi}, \end{aligned} \quad (11)$$

где l_{npi} – расстояние от центра опрыскивателя до распылителя.

Для расчета принимаем:

– высота штанги с учетом регулировки h_{oC} определяется с учетом планирования эксперимента;

– допустимый диапазон отклонения штанги в вертикальной плоскости $Z_H(t)$ составляет до 0,2 м; принимаем средние значения между $Z_{nn3}^{np}(t)$ и $Z_{nn3}^л(t)$ [9];

– значения рельефа рисового чека соответственно под левым и правым колесами опрыскивателя $Z_{nn3}^{np}(t)$ и $Z_{nn3}^л(t)$ при агрофоне вспашка, стерня риса, рапс, чистый пар, озимая пшеница представлены в таблице;

– колея опрыскивателя регулируемая $B_M = 1,4; 1,6; 1,8$ м;

– расстояние от оси опрыскивателя до распылителя по результатам предложенной конструктивно-технологической схемы $l_{npi} = 6,1$ м.

Для определения высоты штанги с учетом регулировки h_{oC} был проведен трехфакторный эксперимент (скорость агрегата v_o , давление в системе p , высота штанги h_o) с тремя градациями каждого фактора (соответственно $v_o = 6, 9, 12$ км/ч; $p = 0,3; 0,5; 0,7$ МПа; $h_o = 2,6; 3,6; 4,6$ м) (рис. 11). Параметром оптимизации являлось количество растений тростника (N_T) на единице площади 1 м^2 после обработки в новом сезоне через 10 месяцев.

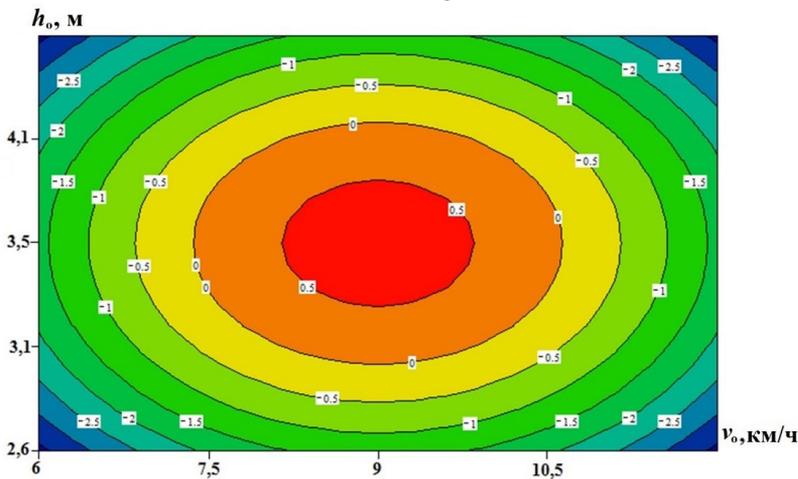


Рис. 11. Фото опрыскивателя с регулируемым значением высоты штанги слева направо: 4,6; 3,6; 2,6 м

Fig. 11. Photo of sprayer with adjustable boom height from left to right: 4.6; 3.6; 2.6 m



Р и с. 12. Фото валика рисового чека после обработки гербицидом: слева – обработано, справа – не обработано
 F i g. 12. Photo of rice paddy field roll after herbicide treatment: on the left – treated, on the right – not treated



Р и с. 13. Двухмерное сечение
 F i g. 13. Two-dimensional section

Уравнение регрессии с мнимыми коэффициентами имеет вид:

$$\begin{aligned}
 N_T = & 0,65 - 0,53 \cdot v_o + 0,23 \cdot p - \\
 & - 0,37 \cdot h_o + 0,363 \cdot v_o \cdot p + \\
 & + 0,212 \cdot v_o \cdot h_o - 0,537 \cdot p \cdot h_o - \\
 & - 2,269 \cdot v_o^2 + 1,531 \cdot p^2 - \\
 & - 2,069 \cdot h_o^2.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

В результате на экспериментальном валике рисового чека количество стеблей тростника на одном квадратном метре составило 4 шт., контрольном (без обработки) – 69 шт. (рис. 12).

Оптимальное значение высоты штанги с учетом регулировки h_{oC} составило 3,5 м (рис. 13). Данное значение используется в расчетах.

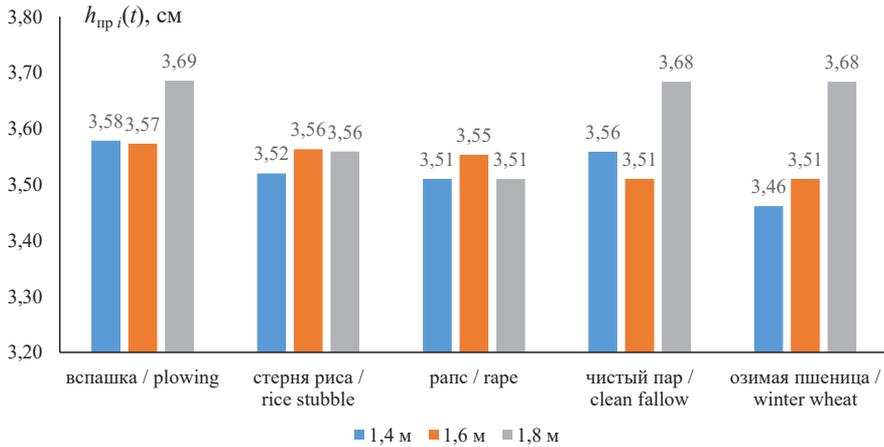
Таблица
Table

Результаты обработки высоты рельефа под колесами опрыскивателя при различном агрофоне
Results of treatment of terrain height under the sprayer wheels at different agronomics

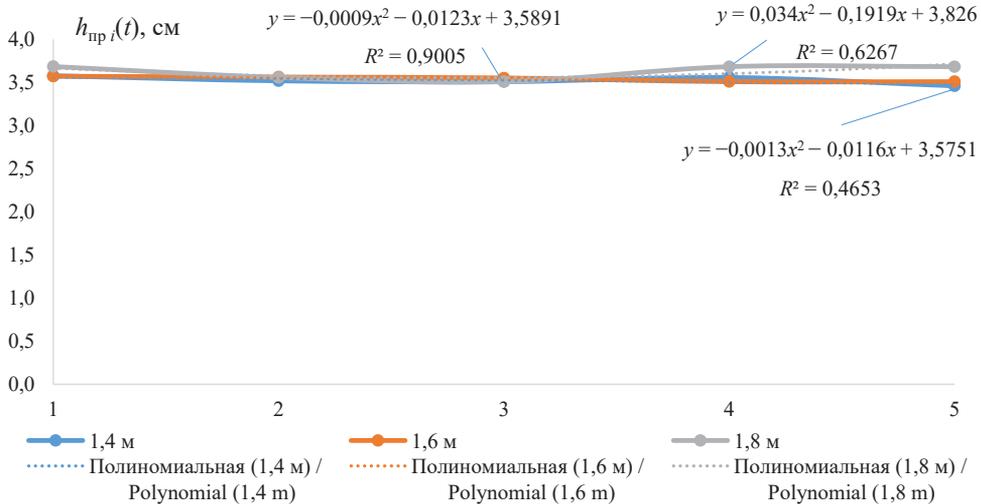
Точки измерений, м / Measurement points, m	Статистические показатели / Statistical Indicators																			
	0			1,4			1,6			1,8										
	Вспашка / Plowing	Стерня риса / Rice stubble	Рапс / Rapeseed	Чистый пар / Pure steam	Озимая пшеница / Winter wheat	Вспашка / Plowing	Стерня риса / Rice stubble	Рапс / Rapeseed	Чистый пар / Pure steam	Озимая пшеница / Winter wheat	Вспашка / Plowing	Стерня риса / Rice stubble	Рапс / Rapeseed	Чистый пар / Pure steam	Озимая пшеница / Winter wheat					
Среднее, см / Average, cm	3	2	1	1	1	4	2	1	2	0	4	3	2	1	1	7	3	1	2	2
Стандартное отклонение, см / Standard deviation, cm	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	1	2	1	1	3	2	1	1	1
Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	89	75	85	97	94	69	69	111	83	173	84	57	102	80	87	41	62	95	88	69
Ошибка выборочной средней, см / Error in the sample mean, cm	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1
Относительная ошибка выборочной средней, % / Relative error of the sample mean, %	28	23	27	30	56	22	22	35	26	102	26	18	32	25	51	13	19	30	28	40

Примечание. Усредненные значения высоты рельефа под колесами опрыскивателя по агрофонам, получим: вспашка – 4,5 см; стерня риса – 2,5 см; рапс – 1,3 см; чистый пар – 1,5 см; озимая пшеница – 1 см. Результаты расчета представлены на рисунках 14 и 15.

Note. Average values of relief heights under sprayer wheels by agronomics, we obtain: plowing – 4.5 cm; rice stubble – 2.5 cm; rapeseed – 1.3 cm; clean fallow – 1.5 cm; winter wheat – 1 cm. Calculation results are shown in Figures 14 and 15.



Р и с. 14. Зависимость $h_{пр,i}(t)$ от агрофона (вспашка, стерня риса, рапс, чистый пар, озимая пшеница)
 F i g. 14. Dependence of $h_{пр,i}(t)$ on agricultural background (plowing, rice stubble, rape, clean fallow, winter wheat)



Р и с. 15. Зависимости расстояния от распылителя до поверхности рисового чека при различном агрофоне: 1 – вспашка; 2 – стерня риса; 3 – рапс; 4 – чистый пар; 5 – озимая пшеница

F i g. 15. Dependences of distance from sprayer to surface of rice paddy field on different agrophones: 1 – plowing; 2 – rice stubble; 3 – rape; 4 – clean fallow; 5 – winter wheat

В результате при высоте установки штанги 3,5 м в среднем расстояние от распылителя до поверхности рисового чека по вспашке составляет 3,61 м; стерне риса – 3,55 м; рапсу – 3,52 м; чистому пару – 3,58; озимой пшенице – 3,55 м.

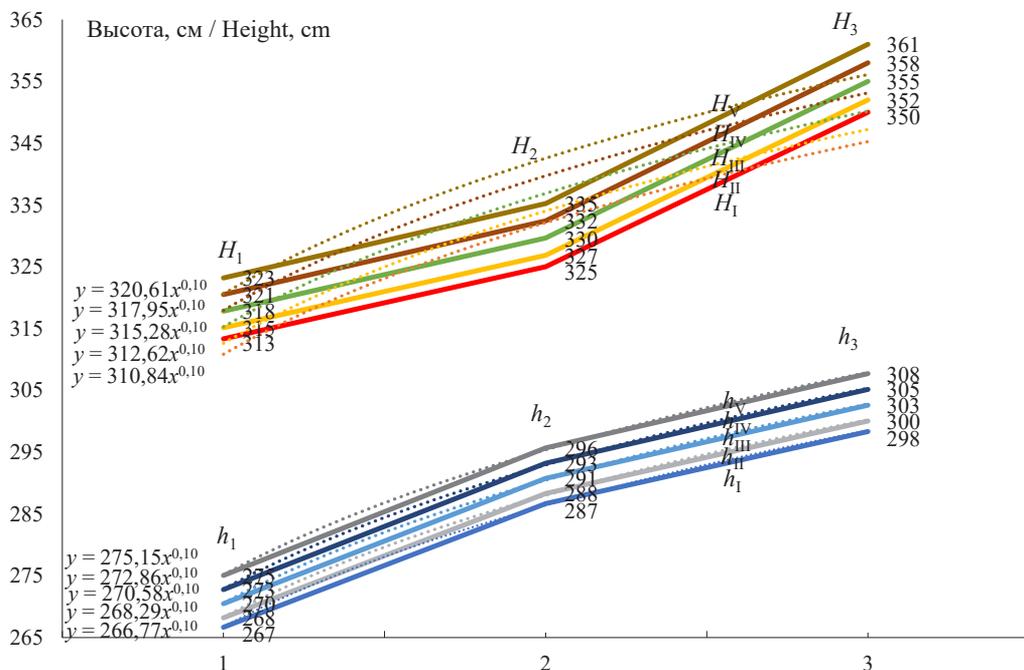
Проводили измерения в 10 рисовых чеках (рис. 16) высоты до верхней точки метелки в ближнем H_1 , среднем

H_2 , дальнем H_3 и нижней точки метелки в ближнем h_1 , среднем h_2 , дальнем h_3 размещении тростника от опрыскивателя. Данные измерения легли в основу обоснования формы конструкции штанги.

В результате получили уравнения штанги с учетом регулируемого значения и различных агрофонов (рис. 17).



Р и с. 16. Измерение высоты тростника
F i g. 16. Measuring reed height



Р и с. 17. Уравнение высоты размещения метелок тростника до верхней (H_1, H_2, H_3) и нижней (h_1, h_2, h_3) точек метелки соответственно в ближнем (1), среднем (2) и дальнем (3) размещении растения от опрыскивателя при различных агрофонах:

h_1-H_1 – регулируемое значение; $h_{II}-H_{II}$ – рапс; $h_{III}-H_{III}$ – озимая пшеница и стерня риса; $h_{IV}-H_{IV}$ – чистый пар; h_V-H_V – вспашка

F i g. 17. Height equation of the reed panicle placement to the upper (H_1, H_2, H_3) and lower (h_1, h_2, h_3) points of the panicle respectively in the near, middle and far plant placement from the sprayer at different agrophones: h_1-H_1 – controlled value; $h_{II}-H_{II}$ – rapeseed; $h_{III}-H_{III}$ – winter wheat, rice stubble; $h_{IV}-H_{IV}$ – clean steam; h_V-H_V – plowing

Обсуждение и заключение

Предложен новый способ локальной обработки метелок тростника рисовой оросительной системы опрыскивателем с новой конструкцией штанги в определенный период вегетации растения. Оптимальным временем применения является время оттока питательных веществ в корень (примерно с июля по сентябрь). Предложена конструктивно-технологическая схема опрыскивателя с правосторонней штангой, выполненной по формуле $y = 310,84x^{0,0955}$ на основании уравнения высоты до верхней точки метелки для регулируемого значения $h_1 - H_1$ (рис. 17).

Возмущения, вызванные неровностью рельефа, ведут к колебаниям

штанги в вертикальном и горизонтальном направлениях. На основе расчета модели перемещения опрыскивателя диапазон изменения положения штанги отличается от регулируемого значения по вспашке – 3,1 %; стерне риса – 1,4 %; рапсу – 0,6 %; чистому пару – 2,3 %; озимой пшенице – 1,4 %. На основании полученных данных наибольшее значение будет на вспашке – 3,1 %, наименьшее – на рапсе (0,6 %). Полученные данные показывают незначительное отличие изменения колебаний штанги предлагаемого опрыскивателя от регулировочного значения, что положительно влияет на качество и точность обработки метелок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афашижев Ю. С. Штанговый ультрамалообъемный опрыскиватель для интенсивного садоводства // Известия Горского государственного аграрного университета. 2011. Т. 48, № 1. С. 170–173. EDN: OQLQHF
2. Смирнов И. Г., Личман Г. И., Марченко Л. А. Алгоритм расчета параметров штангового садового опрыскивателя для внесения пестицидов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 4. С. 26–33. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-26-33>
3. Маслов Г. Г., Борисова С. М. Использование ультрамалообъемного опрыскивателя при обработке садов и виноградников // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 149. С. 1–13. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-149-001>
4. Догода П. А., Догода А. П., Красовский В. В. Исследование воздушно-жидкостного потока, создаваемого камерным опрыскивателем при химической защите виноградных насаждений // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2018. № 13 (76). С. 97–102. EDN: XNGNZB
5. Щелевой распылитель жидкости в технологии опрыскивания растений / И. М. Киреев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2022. № 9 (303). С. 12–14. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-9-12-14>
6. Best Methods for Applying Fungicide to Grain Heads Using Air Assisted Sprayer / S. Halley [et al.] // NDSU Extension Service 2010. URL: https://library.ndsu.edu/ir/bitstream/handle/10365/10438/ae1480_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 08.02.2023).
7. Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity / E. C. Oerke [et al.] // Bonn, 2010. URL: <https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/72801/1/206.pdf.pdf> (дата обращения: 08.02.2023).
8. Sun H., Li M., Qin Z. Detection System of Smart Sprayers: Status, Challenges, and Perspectives. 2012. P. 1–15. URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/585> (дата обращения: 08.02.2023).
9. Машина для дифференцированного внесения пестицидов : патент 2748996 Российская Федерация / Измайлов А. Ю., Марченко Л. А., Смирнов И. Г., Спиридонов А. Ю. № 2020131413 ; заявл. 24.09.2020 ; опубл. 02.06.2021. EDN: VYCVZS
10. Беспилотный вертолет для внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов в точном земледелии : патент 2754790 Российская Федерация / Измайлов А. Ю. [и др.] № 2021107492 ; заявл. 22.03.2021 ; опубл. 07.09.2021. EDN: TUPSYS

11. Разработка системы управления автономного полевого робота дифференцированного внесения агрохимических средств / М. А. Мирзаев [и др.] // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. 2021. С. 420–427. EDN: ANLDBN
12. Петровская Е. В. Выбор параметров работы штанговых опрыскивателей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 6. С. 28. EDN: KXMIKL
13. Василенко П. М. Построение математических моделей машинных агрегатов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1975. № 11. С. 51–54.
14. Василенко П. М. Построение расчетных моделей функционирования многомассовых машинных агрегатов на основании канонических уравнений динамики // Доклады ВАСХНИЛ. 1981. № 12. С. 35–37.
15. Василенко П. М. Основные методы моделирования и перспективы их применения при разработке сельскохозяйственных машин // БТИ ГОСНИТИ. 1996.
16. Эксплуатация машинно-тракторного парка / Г. Г. Маслов [и др.]. Краснодар : КубГАУ, 2022. 205 с. URL: <https://edu.kubsau.ru/course/view.php?id=115> (дата обращения: 08.02.2023).
17. Эксплуатация технических средств АПК / Г. Г. Маслов [и др.]. Краснодар : КубГАУ, 2022. 137 с. URL: <https://edu.kubsau.ru/course/view.php?id=115> (дата обращения: 08.02.2023).
18. Рахимов Р. С., Рахимов И. Р., Фетисов Е. О. Определение сил, действующих на универсальную посевную секцию // АПК России. 2020. Т. 27, № 5. С. 797–807. EDN: RKANKE
19. Рахимов И. Р. Обоснование устойчивости хода широкозахватных прицепных машин в горизонтальной плоскости // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (59). С. 106–115. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-59-3-106-115>
20. Агрегат для химической обработки посевов : патент 67402 Российская Федерация / Андреев А. В. № 2007107329/22 ; заявл. : 26.02.2007; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU67402U1_20071027 (дата обращения: 08.02.2023).
21. Штанга складная для опрыскивателя склонов : патент 1815 Республика Беларусь / Болвонич В. В., Селицкий В. Ф., Легенький С. А. № u 20040364; заявл. : 26.07.2004; опубл. 27.01.2005. URL: <https://bypatents.com/3-u1815-shtanga-skladnaya-dlya-opryskivatelya-sklonov.html> (дата обращения: 08.02.2023).
22. Штанга складная для опрыскивателя дамб каналов : патент 94030568 Российская Федерация / Бредихин Н. П. [и др.] № 94030568/15 ; заявл. : 17.08.1994 ; опубл. 10.06.1996. URL: https://i.moscow/patents/ru94030568a1_19960610 (дата обращения: 08.02.2023).
23. Опрыскиватель : авторское свидетельство 180921 СССР / Войцеховский Б. В., Овчару А. М., Кузнецов Ю. Г. № 920766/30-15 ; заявл. : 13.08.1964 ; опубл. 26.03.1966. Бюл. № 8. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 08.02.2023).
24. Опрыскиватель : патент 9344 Республика Беларусь / Кондратьев В. Н., Райкевич Н. Г. № а 20040506 ; заявл. : 03.06.2004 ; опубл. 30.12.2005. URL: <https://bypatents.com/3-9344-opryskivatel.html> (дата обращения: 08.02.2023).
25. Опрыскиватель для обработки кустарниковых растений : авторское свидетельство 1158137 СССР / Фарбер В. С., Церуашвили Г. Е. № 3614077 ; заявл. : 01.07.1983 ; опубл. 30.05.1985. Бюл. № 20. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 08.02.2023).
26. Опрыскиватель : патент 13260 Республика Беларусь / Мисун Л. В. [и др.] № а 20080189 ; заявл. : 21.02.2008 ; опубл. 30.10.2009. URL: <https://bypatents.com/3-13260-opryskivatel.html> (дата обращения: 08.02.2023).
27. Механизация растениеводства / В. Н. Солнцев [и др.]. М. : ИНФРА-М, 2022. 283 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008143255> (дата обращения: 08.02.2023).
28. Средства механизации для химической защиты высокостебельных культур / Е. В. Труфляк [и др.]. Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2022. С. 266–288. EDN: GGKXFK
29. Протокол испытаний № 01-52-20 (5140132). Опрыскиватель штанговый самоходный «Туман-3» [Электронный ресурс]. URL: http://altmis.ru/board/mashiny_dlja_primenenija_him_sredstv_zawity_rastenij/opylivatelyi/opryskivatel_shtangovyj_samokhodnyj_tuman_3/93-1-0-529 (дата обращения: 08.02.2023).

30. Протокол испытаний № 07-56-2015 (6240712). Испытания импортного образца опрыскивателя Amazone UX 6200 [Электронный ресурс]. URL: https://kubmis.ru/wp-content/uploads/2021/03/opryskivatel_amazone_6200.pdf (дата обращения: 08.02.2023).

31. Опрыскиватель Berthoud raptor 4240 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.povmis.ru/isyptaniya/rezultaty-isyptaniyi/2010/72-posevnye-mashiny/546--lberthoud-raptor-4240r> (дата обращения: 08.02.2023).

32. Самоходный опрыскиватель Maestria 21-39 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.povmis.ru/isyptaniya/rezultaty-isyptaniyi/2010/72-posevnye-mashiny/544--lmaestria-21-39r> (дата обращения: 08.02.2023).

33. Труфляк Е. В., Шутка В. М. Опрыскиватель для борьбы с камышом в рисовых чеках // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 104. С. 1971–1986. EDN: TFWSNH

34. Опрыскиватель для обработки камыша, растущего в элементах оросительной системы рисовых чеков : патент 2587768 Российская Федерация / Труфляк Е. В., Шутка В. М. № 2015106262/13 ; заявл. 24.02.2015 ; опубл. 20.06.2016. Бюл. № 27. 7 с. EDN: ZESQPE

Поступила 10.02.2023; одобрена после рецензирования 16.03.2023; принята к публикации 26.03.2023

Об авторах:

Труфляк Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации и технического сервиса, руководитель центра прогнозирования и мониторинга в области точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>, Researcher ID: D-1301-2018, Scopus ID: 57188716454, trufliak@mail.ru

Хуснетдинов Вячеслав Евгеньевич, преподаватель-исследователь, специальность 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса» Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6638-1861>, bolt.74@list.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. В. Труфляк – общее руководство исследованием; участие во всех этапах эксперимента; обработка и анализ данных.

В. Е. Хуснетдинов – обзор литературы; участие во всех этапах полевых исследований; обработка полученных экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Afasizhev Yu.S. [Boom Ultra-Low-Volume Sprayer for Intensive Horticulture]. *Journal of Proceedings of the Gorsky SAU*. 2011;48(1):170–173. (In Russ.) EDN: OQLQHF

2. Smirnov I.G., Lichman G.I., Marchenko L.A. Calculation Algorithm for the Parameters of a Boom Garden Sprayer for Pesticide Application. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022;16(4):26–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-26-33>

3. Maslov G.G., Borisova S.M. The Use of Ultimal Volumetric Sprayer in the Treatment of Orchards and Vineyards. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2019;(149):1–13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-149-001>

4. Dogoda P.A., Dogoda A.P., Krasovsky V.V. The Study of Air-Liquid Flow Created by Chamber Sprayer during Chemical Protection of Vine Plantations. *Izvestiya selskokhozyaystvennoy nauki Tavriy*. 2018;(13):97–102. (In Russ.) EDN: XNGNZB

5. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A., et al. Slit Sprayer in the Technology of Spraying Plants. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2022;(9):12–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-9-12-14>
6. Halley S., Hofman V., Van E. G., et al. Best Methods for Applying Fungicide to Grain Heads Using Air Assisted Sprayer. 2010. Available at: https://library.ndsu.edu/ir/bitstream/handle/10365/10438/ae1480_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed 08.02.2023).
7. Oerke E.C., Gerhards R., Menz G., et al. Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity. Bonn; 2010. Available at: <https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/72801/1/206.pdf.pdf> (accessed 08.02.2023).
8. Sun H., Li M., Qin Z. Detection System of Smart Sprayers: Status, Challenges, and Perspectives. 2012. p. 1–15. Available at: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/585> (accessed 08.02.2023).
9. Izmailov A.Y., Marchenko L.A., Smirnov I.G., Spiridonov A.Yu. Machine for Differentiated Pesticide Application: Patent 2748996 Russian Federation / 24.09.2020; publ. 02.06.2021. (In Russ.) EDN: VYCVZS
10. Izmailov A.Y., Marchenko L.A., Smirnov I.G., Myzin M.V., Spiridonov A.Yu.V., Nosov S.V. Unmanned Helicopter for Application of Pesticides, Fertilizers and Other Agrochemicals in Precision Farming: Patent 2754790 Russian Federation / No. 2021107492; publ. 07.09.2021. (In Russ.) EDN: TUPSYS
11. Mirzaev M.A., Dyshekov A.I., Smirnov I.G., et al. [Development of the Control System of an Autonomous Field Robot of Differential Application of Agrochemical Agents]. In: XXXIII International Innovative Conference of Young Scientists and Students on Problems of Machine Science. 2021. p. 420–427. (In Russ.) EDN: ANLDBN
12. Petrovskaya E.B. The Choice of Parameters of the Boom Sprayers Operation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2006;(6):28. (In Russ.) EDN: KXXMIKL
13. Vasilenko P.M. [Construction of Mathematical Models of Machine Units]. *Mechanization and Electrification of Socialist Agriculture*. 1975;(11):51–54. (In Russ.)
14. Vasilenko P.M. [Construction of Calculation Models of Multi-Mass Machine Units Functioning on the Basis of Canonical Equations of Dynamics]. *Reports of VASKhNIL*. 1981;(12):35–37. (In Russ.)
15. Vasilenko P.M. [Basic Methods of Modeling and Prospects for Their Use in the Development of Agricultural Machinery]. *BTI GOSNITI*. 1996. (In Russ.)
16. Maslov G.G., Yudina E.M., Rinas N.A., et al. [Operation of the Machine and Tractor Fleet]. Krasnodar: KubGAU; 2022. Available at: <https://edu.kubsau.ru/course/view.php?id=115> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
17. Maslov G.G., Yudina E.M., Rinas N.A., et al. [Exploitation of Technical Means of Agroindustrial Complex]. Krasnodar: KubGAU; 2022. Available at: <https://edu.kubsau.ru/course/view.php?id=115> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
18. Rakhimov R.S., Rakhimov I.R., Fetisov E.O. Determination of Forces Acting on the Universal Seeding Section. *Agroindustrial Complex of Russia*. 2020;27(5):797–807. (In Russ.) EDN: RKANKE
19. Rakhimov I.R. Substantiation of the Course Stability of Wide-Reach Trailed Machines in the Horizontal Plane. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(3):106–115. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-59-3-106-115>
20. Andreev A.V. [Unit for Chemical Treatment of Crops: Patent 67402 of the Russian Federation] / 2007107329/22; application form.: 26.02.2007; publ. 27.10.2007, Bull. No. 30. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU67402U1_20071027 (accessed 08.02.2023) (In Russ.)
21. Bolvinovich V.V., Selitskiy V.F., Legenkiy S.A. Folding Boom for a Slope Sprayer: Patent 1815 Republic of Belarus u 20040364; app. 26.07.2004; publ. 27.01.2005. Available at: <https://bypatents.com/3-u1815-shtanga-skladnaya-dlya-opryskivatelya-sklonov.html> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
22. Bredikhin N.P., Blagovestny L.S., Balaklai G.T., Brezhnev V.I. Folding Boom for a Canal Dam Sprayer: Patent 94030568 Russian Federation No. 94030568/15; app. 17.08.1994; publ. 10.06.1996. Available at: https://i.moscow/patents/ru94030568a1_19960610 (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
23. Voitsekhovskiy B.V., Ovcharuk A.M., Kuznetsov Y.G. Sprayer: Certificate of Authorship USSR 180921; app. form. 920766/30-15; advertisement 13.08.1964; publ. 26.03.1966. Bulletin No. 8. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (accessed 08.02.2023). (In Russ.)

24. Kondratyev V.N., Raikevich N.G. Sprayer: Patent 9344 Republic of Belarus No. 20040506; app. 03.06.2004; publ. 30.12.2005. Available at: <https://bypatents.com/3-9344-opryskivatel.html> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
25. Farber V.S., Tseruashvili G.E. Sprayer for a Shrub Plant Treatment: Certificate of Authorship USSR 1158137, No. 3614077; app. 01.07.1983; publ. 30.05.1985. Bull. No. 20. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
26. Misun L.V., Misun V. L., Ageychik V.A. et al. Sprayer: Patent 13260 Republic of Belarus; app. No. 20080189; 21.02.2008; publ. 30.10.2009. Available at: <https://bypatents.com/3-13260-opryskivatel.html> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
27. Solntsev V.N., Tarasenko A.P., Orobinsky V.I., et al. Mechanization of Plant Growing. Moscow: INFRA-M; 2022. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008143255> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
28. Truflyak E.V., Khusnetdinov V.E., et al. [Means of Mechanization for Chemical Protection of High-Stem Crops]. Petrozavodsk; ICNP New Science; 2022. P. 266–288. (In Russ.) EDN: GGKXFK
29. Test Protocol No. 01-52-20 (5140132). Self-Propelled Boom Sprayer Tuman-3. Available at: http://altmis.ru/board/mashiny_dlja_primenenija_him_sredstv_zawity_rastenij/opylivately/opryskivatel_shtangovyj_samokhodnyj_tuman_3/93-1-0-529 (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
30. Test Protocol № 07-56-2015 (6240712). Tests of the Imported Sample of Amazone UX 6200 Sprayer. Available at: https://kubmis.ru/wp-content/uploads/2021/03/opryskivatel_amazone_6200.pdf (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
31. Berthoud Raptor 4240 Sprayer. Available at: <http://www.povmis.ru/ispytanija/rezultaty-ispytaniji/2010/72-posevnye-mashiny/546--lberthoud-raptor-4240r> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
32. Maestria 21-39 Self-Propelled Sprayer. Available at: <http://www.povmis.ru/ispytanija/rezultaty-ispytaniji/2010/72-posevnye-mashiny/544--lmaestria-21-39r> (accessed 08.02.2023). (In Russ.)
33. Truflyak E.V., Shutka V.M. Sprayer to Control Reed in Rice Fields. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2014;(104):1971–1986. (In Russ.) EDN: TFWSNH
34. Truflyak E.V., Shutka V.M. Sprayer for Treatment of Reeds Growing in the Elements of the Irrigation System of Rice Fields: Patent 2587768 Russian Federation. No. 2015106262/13; app. 24.02.2015; publ. 20.06.2016. Bull. No. 27. P. 7. (In Russ.) EDN: ZESQEP

Submitted 10.02.2023; revised 16.03.2023; accepted 26.03.2023

About the authors:

Evgeny V. Truflyak, Dr.Sci.(Engr.), Professor, Head of the Chair of Operation and Technical Service, Head of the Center for Forecasting and Monitoring in the Field of Precision Agriculture, Automation and Robotization of the Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>, Researcher ID: D-1301-2018, Scopus ID: 57188716454, trufliak@mail.ru

Vyacheslav E. Khusnetdinov, Teacher-Researcher, Specialty Technologies, Machines and Equipment for Agro-Industrial Complex, Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6638-1861>, bol.t.74@list.ru

Authors contribution:

E. V. Truflyak – general management of the study; participation in all stages of the experiment; data processing and analysis.

V. E. Khusnetdinov – literature review; participation in all stages of field research; processing of the obtained experimental data.

All authors have read and approved the final manuscript.



Моделирование процесса обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте

Н. И. Джабборов¹, А. В. Добринов¹✉, А. П. Савельев²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал федерального научного агроинженерного центра ВИМ (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет (г. Саранск, Российская Федерация)

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Обработка почвы – важнейшее звено в технологии возделывания сельскохозяйственных культур. В настоящее время на обработку почвы в среднем приходится 35–40 % энергетических затрат всего объема полевых работ и до 20 % энергии, потребляемой в сельском хозяйстве. Обработка почвы позволяет регулировать водно-воздушный режим, интенсивность биологических процессов и поддерживать необходимое фитосанитарное состояние почвы и посевов. Энергоемкость и качество обработки почвы зависят от степени совершенства технических средств. Математическое моделирование процесса обработки почвы различными почвообрабатывающими рабочими органами является актуальной задачей, поскольку позволяет разработать более совершенные энергоэффективные технические средства.

Цель статьи. Представить результаты исследования по разработке математических моделей для определения и анализа показателей процесса обработки почвы рабочим органом скобообразной формы.

Материалы и методы. В процессе теоретических исследований скобообразного почвообрабатывающего рабочего органа для сплошной поверхностной обработки почвы использовались методы анализа, обобщения и систематизации, теоретической механики, математической статистики и моделирования, теории вероятности, методы дифференциального исчисления, теория взаимодействия рабочих органов с почвой и их движения по поверхности поля.

Результаты исследования. Получены аналитические модели для определения создаваемого давления, тягового сопротивления, суммарной силы сжатия почвенного пласта, времени его движения через рабочий орган, требуемой мощности и количества энергии, затрачиваемых на сжатие и крошение почвенного пласта в зависимости от скорости перемещения предложенного скобообразного рабочего органа. Приведены графические зависимости исследованных параметров скобообразного почвообрабатывающего рабочего органа и установлены закономерности их изменения. **Обсуждение и заключение.** Предложенные математические модели и выявленные закономерности изменения параметров процесса обработки почвы рабочим органом замкнутого контура позволят разработать новые эффективные рабочие органы, рассчитать их конструктивно-технологические параметры.

© Джабборов Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П., 2023



Ключевые слова: обработка почвы, скобообразный рабочий орган, моделирование, тяговое сопротивление, концентрация напряжений, мощность, давление, сила сжатия почвенного пласта

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Джабборов Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П. Моделирование процесса обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 175–191. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>

Original article

Modeling of the Tillage Process by the Method of Stress Concentration in the Tilled Layer

N. I. Jabborov^a, A. V. Dobrinov^a✉, A. P. Saveluev^b

¹ Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM

(Saint-Petersburg, Russian Federation)

² National Research Mordovia State University

(Saransk, Russian Federation)

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Tillage is the most important part of the agricultural crops cultivation technology. Currently, tillage accounts for 35–40% of the energy consumption of the total volume of field work and up to 20% of the energy consumed in the agriculture sector. Tillage allows regulating the water-air regime and the intensity of biological processes, maintaining the necessary phytosanitary condition of the soil and crops. The energy intensity and quality of tillage depends on the degree of excellence of technical means. Mathematical modeling of the tillage process by various soil-cultivating working bodies is an urgent task to develop more advanced energy-efficient technical means.

Aim of the Article. The purpose of the research is to develop mathematical models for determining and analyzing the indicators of tilling the soil by the bracket-shaped working body.

Materials and Methods. In the process of theoretical studies of the bracket-shaped tillage working body for continuous surface tillage, there were used the methods of analysis, generalization and systematization, theoretical mechanics, mathematical statistics and modeling, probability theory, differential calculation, and the theory of interaction of working bodies with soil and their movement over the field surface.

Results. The analytical models for determining the pressure, traction resistance, the total force of the soil layer compression, the time of passage of the working body, the required power and the quantity of energy expended on compression of the soil layer depending on the speed of the working body movement are obtained. Graphic dependencies of the investigated parameters of the bracket-shaped tillage working body are presented. The dynamics of parameter changes is identified.

Discussion and Conclusion. The proposed mathematical models and the revealed regularities of changing the parameters of tilling the soil by the closed-cycle working body will make it possible to develop new effective working bodies and optimize the design, technological parameters and modes of their operation.

Keywords: tillage, bracket-shaped working body, modeling, traction resistance, stress concentration, power, head, compressive force of the soil layer

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

For citation: Jabborov 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. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>

Введение

В последнее время в сельскохозяйственном производстве резко возрос интерес к поиску и разработке новых методов и способов, обеспечивающих снижение энергоемкости и повышение качества технологических процессов обработки почвы.

На агротехнические показатели и тяговое сопротивление почвообрабатывающих машин значительное влияние оказывают физико-механические свойства почвы (удельное сопротивление, влажность и твердость почвы, коэффициент трения почвы о сталь, абразивные свойства почвы), изменяющиеся в зависимости от погодных условий, севооборота культур, внесения в почву минеральных и органических удобрений и т. д. Эти вопросы достаточно широко изучены в работах многих авторов¹.

Значительное количество результатов теоретических и экспериментальных исследований ученых посвящено раскрытию новых закономерностей процессов обработки почвы различными рабочими органами и машинами [1–4]. При внедрении почвообрабатывающей техники в производство разрабатываются методы оценки эффективности функционирования в различных зонах с учетом ее работоспособности и надежности в процессе эксплуатации [5–7].

При этом обоснование конструктивных параметров новых способов обработки почвы и типов рабочих органов, принципиально отличающихся от традиционных приемов, применяемых на

практике, невозможно без раскрытия теоретических основ их взаимодействия с почвой с учетом ее изменяющихся свойств. Для этого необходима разработка модели процесса взаимодействия рабочих органов с почвой, обеспечивающая возможность определения и анализа агротехнических и энергетических показателей процесса обработки почвы и обоснования их конструктивно-технологических параметров.

Так, на основе применения теории деформации грунтов обрабатываемого материала авторами статьи был разработан оригинальный рабочий орган скобообразной формы, создающий во время движения сжатие внутренних капилляров почвенного пласта. При выходе из конусообразной скобы вследствие отсутствия сжимающей силы пласт почвы под действием давления сжатых внутрипочвенных газов разрушается (крошится), образуя при этом мелкокомковатую структуру [8].

В связи с этим физико-математическое моделирование предлагаемого способа обработки почвы с использованием скобообразного рабочего органа для создания и концентрации напряжения в обрабатываемом слое почвы составляет основу данного исследования.

Цель исследования – разработка математических моделей для определения и анализа показателей процесса обработки почвы рабочим органом скобообразной формы.

Обзор литературы

С целью достижения необходимых агротехнических и энергетических показателей работы для обеспечения

¹ Бурченко П. П. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения. Рос. акад. с.-х. наук, Гос. науч. учреждение Всерос. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва (ГНУ ВИМ). М. : ВИМ, 2002. 211 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002151495> (дата обращения: 20.10.2022); Панов И. М., Ветохин В. И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс, 2008. 266 с.; Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977. 328 с.

конкурентоспособности создаваемой техники при теоретическом и практическом обосновании параметров новых рабочих органов и почвообрабатывающих машин исходят из ряда требований, главными из которых являются степень крошения почвы, тяговое сопротивление, устойчивость хода рабочих органов по глубине, выровненность поверхности поля.

При обосновании основных подходов к проектированию почвообрабатывающих машин и в процессе разработки модели взаимодействия рабочих органов с почвой экспериментально подтверждено, что крошение почвенного пласта на лемешно-отвальной поверхности происходит за счет возникновения сил взаимодействия между элементами пласта с разным шагом [9].

При обосновании конструктивных особенностей и исследовании работы нового чизельного комбинированного агрегата, совмещающего за один проход по полю три технологические операции (глубокое рыхление, крошение верхнего слоя почвы и внесение удобрений), установлено, что рациональная конструкция рабочих органов и их комбинация позволяет снизить энергоемкость технологического процесса. Так, Г. Г. Масловым получена аналитическая зависимость для определения потребной мощности двигателя почвообрабатывающего агрегата [10].

Для обеспечения качественной обработки, снижения тягового сопротивления на дисковых рабочих органах с вогнутой стороны выполнены прорезы, с выступающими в направлении его вращения зубьями, которые также имеют вид непрерывной волнистой линии. Установлена форма вырезов между зубьями и число зубьев, обеспечивающих полное схождение с рабочего органа почвы, растительных остатков и исключаящих забивание вырезов [11].

С целью улучшения качества крошения почвы разработаны рабочие органы

с переменным углом резания. Выявлено, что лезвие с переменным углом резания увеличивает давление на почвенный пласт по сравнению с лезвием, имеющим постоянный угол резания. Подтверждено, что рабочие органы с переменным углом резания на 20–50 % лучше крошат обрабатываемый пласт, чем типовые [12].

И. М. Бартнев изучил вопросы ударного разрушения и активного оборот почвенного пласта при вспашке новым комбинированным рабочим органом, использование которого на плугах исключает необходимость в дополнительной обработке почвы, связанной с дроблением почвенных глыб и выравниванием поверхности пашни [13].

Также рассмотрен процесс крошения почвенного пласта под воздействием овалобразного рабочего органа. При этом разделению материала под воздействием лезвия предшествует процесс предварительного его сжатия до возникновения на его кромке разрушающего контактного напряжения. Пласт почвы при проходе через рабочий орган подвергается упруго-пластической деформации. В результате теоретических и практических исследований обоснованы конструктивно-технологические параметры рабочего органа [14].

На основе использования принципов бионики и упрочняющих технологий обоснованы конструктивно-технологические параметры ножа почвенной фрезы для крошения, рыхления, перемешивания, частичного оборачивания почвенного пласта, разрезания растительных и пожнивных остатков, уничтожения сорняков, при этом обеспечивается продолжительная сохранность геометрических параметров [15].

Для ротационных орудий с эллипсовидными дисками обоснованы рациональные значения технологических параметров ротационного орудия с эллипсовидными дисками. Установлено, что в пределах рабочих скоростей

почвообрабатывающий агрегат с эллипсоидными дисками обеспечивает выполнение агротехнических требований к поверхностной обработке почвы [16].

Экспериментальными исследованиями доказана эффективность расположения на стойке комбинированного рабочего органа двух элементов для глубокой и мелкой обработки почвы на одной стойке для послойной безотвальной обработки почвы в виде долота для глубокого рыхления и криволинейного рыхлителя для мелкой обработки почвы. Такое решение обеспечивает заданное качество крошения пласта [17].

Разработанный комбинированный рабочий орган для обработки междурядий посевов пропашных культур состоит из двух элементов: двухъярусного катка и Т-образной лапы. Их работа обеспечивает одновременные разнонаправленные действия на пласт почвы. При этом Т-образная лапа с углом крошения 12° оказывает на почву фронтальное воздействие. Экспериментально установлено, что применение такого рабочего органа снижает площадь испарения на 15–20 %, создает мульчирующий слой [18].

По результатам проведенных экспериментов для определения показателей крошения и рыхления суглинистой почвы были выявлены зависимости между коэффициентом крошения и удельной потенциальной энергией, накопленной суглинистой почвой. Доказано, что для суглинистой почвы, находящейся в состоянии физической спелости, крошение начинается при удельной потенциальной энергии 7 622 Па [19].

Исследованиями по определению прочностных характеристик почв ненарушенного строения, значения пределов прочности дерново-подзолистой почвы на сжатие и растяжение в зависимости от абсолютной влажности и количества растительных остатков, определено, что

наибольшим сопротивлением к сжатию по всем категориям сельскохозяйственных угодий характеризовались почвы супесчаного гранулометрического состава [20]. На основе метода проектирования рабочих органов для рыхления почвы с использованием деформации растяжения доказано, что сухие почвы обладают высокой прочностью при сжатии [21].

По результатам исследований влияния значений абсолютной влажности суглинистой почвы на модуль упругости первого рода получены пределы прочности почвы на растяжение и сжатие, коэффициент рыхления и другие характеристики почв².

Наиболее эффективным способом ударного разрушения почвенных глыб и в целом почвенного пласта является свободный удар – удар на лету по глыбам и пласту, оторванными от массива почвы, поднятыми над дном борозды и находящимися в воздухе, вращающимся ударником. Эффективность способа обоснована в процессе основной обработки почвы в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения с целью получения высокой степени крошения, снижения энергоемкости обработки [22].

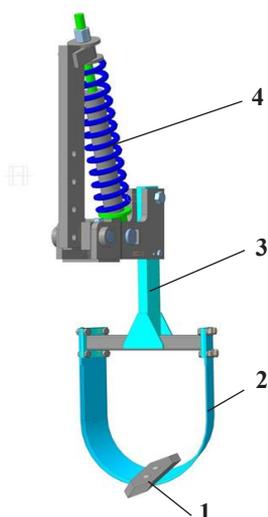
Динамический удар и вибрация почвообрабатывающего разработанного рабочего органа с энергонакопительно-передающим устройством оказывают значительное влияние на почвенный слой в виде дополнительной степени рыхления, а накопленная энергия удара обеспечивает снижение тягового сопротивления рабочего органа [23; 24].

Для оценки эффективности и выбора наиболее энергоэффективных почвообрабатывающих рабочих органов используют следующую систему критериев: удельное тяговое сопротивление активной фронтальной площади, коэффициент террадинамического сопротивления, основные показатели качества обработки почвы [25].

² Лобачевский Я. П., Старовойтов С. И. Физические аспекты суглинистой почвы. Брянск, 2015. 92 с.

Материалы и методы

Объектом исследований являлся скобообразный почвообрабатывающий рабочий орган (рис. 1) для сплошной поверхностной обработки различных типов почв на глубину до 20 см.



Р и с. 1. Общий вид скобообразного рабочего органа: 1 – наральный; 2 – скоба; 3 – стойка крепления скобы; 4 – предохранитель

F i g. 1. General view of the bracket-shaped working body: 1 – loosening paw; 2 – bracket; 3 – stand; 4 – safety mechanism

Рабочий орган состоит из скобы 2, боковая поверхность которой выполнена в виде половины усеченного конуса, центры его нижнего и верхнего оснований смещены друг относительно друга. В верхней части скоба 2 крепится к поперечной балке стойки 3. В нижней точке вогнутой боковой поверхности скобы 2 жестко крепится рыхлительная лапа 1. Рабочий орган крепится к раме посредством автоматического предохранителя 4.

В процессе движения пласт почвы, подрезанный передней рабочей кромкой скобы 2 и рыхлительной лапой 1 рабочего органа приподнимается и передвигается вдоль ее конусообразной части. Во время

движения он подвергается сжатию благодаря смещенному центру основания задней конусной части относительно передней рабочей части скобы 2. При выходе пласта из скобы из-за отсутствия сжимающей силы почва под действием давления сжатия начинает разрушаться или рассыпаться, т. е. происходит ее крошение.

В процессе исследования применяли методы анализа, обобщения и систематизации, теоретической механики, математической статистики и моделирования, теории вероятности, дифференциального исчисления, теорию взаимодействия рабочих органов с почвой и их движения по поверхности поля.

Результаты исследований

Анализ исследований показал, что применяемые в настоящее время почвообрабатывающие рабочие органы разрушают связи между отдельными структурными агрегатами почвы посредством упруго-пластической деформации. Почва деформируется вследствие резания, сжатия, сдвига, растягивания и кручения. Сопротивление почвы и ее рыхление при деформации сжатия практически не исследовано, при этом между удельным сопротивлением почвы и ее твердостью, пластичностью, упругостью, вязкостью и хрупкостью существует сильная корреляционная связь³ [26].

В процессе работы почвообрабатывающего рабочего органа для поверхностной обработки почвы и уничтожения сорных растений происходит концентрация напряжений почвенного пласта в зоне его контакта с внутренней боковой поверхностью скобы 2 и ее вертикальной частью (рис. 1). При этом с увеличением скорости движения интенсивность деформации почвы в обрабатываемом пласте повышается.

Математическая модель для определения силы R , сжимающей почвенный

³ Хайлис Г. А. Механико-технологические свойства сельскохозяйственных материалов. Луцк : ЛГТУ, 1998. 268 с.

пласт в зависимости от рабочей скорости перемещения скобообразного рабочего органа и силы сопротивления почвы деформации P , может быть описана следующим выражением [14]:

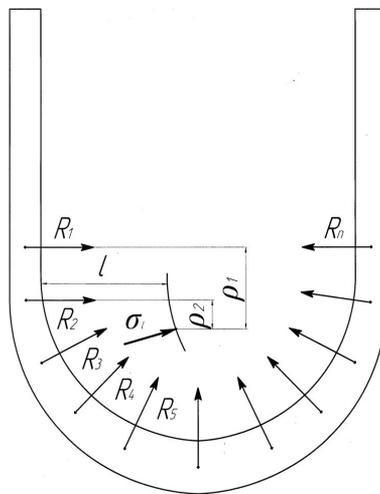
$$R = \frac{2m}{C_1} \left[\frac{8A^2 l_d \cos \beta}{\left(\sqrt{V_p^2 + 4Al_d \cos \alpha} + V_p \right)} - \frac{2AV_p}{\sqrt{V_p^2 + 4Al_d \cos \alpha} - V_p} - \frac{P}{2m} \right], \quad (1)$$

где m – масса почвенного пласта, кг; l_d – ширина зоны деформации почвенного пласта, мм; β – угол между боковыми поверхностями вертикальной части скобы, град.; V_p – скорость перемещения рабочего органа, м/с; α – угол крошения рабочего органа, град.; P – сила сопротивления почвы деформации, кН; $A = b_k(h_1 + \varepsilon b_1 - \varepsilon b_k)$ – коэффициент; b_k – ширина проема при выходе пласта из вертикальной части скобы рабочего органа, мм; h_1 – толщина слоя почвы, поступающего в рабочий орган, мм; b_1 – ширина пласта поступающего в рабочий орган, мм; ε – коэффициент вертикального расширения, зависящий от типа почвы; $C_1 = \frac{\sin \beta - f \cos \beta}{\cos \beta + f \sin \beta}$ – коэффициент; f – коэффициент трения почвы по стали.

Из формулы (1) следует, что на рыхление почвы методом повышения интенсивности ее деформации и концентрации напряжения влияют следующие показатели: твердость и плотность почвы, площадь фронтальной проекции рабочего органа, углы резания и крошения почвы, скорость перемещения рабочего органа, траектория движения почвы, динамическое давление, глубина обработки почвы.

Напряжение в почвенном пласте при действии группы сил по профилю скобы рабочего органа можно представить как сумму напряжений от действия

отдельных сил, если их рассматривать как дискретные величины (рис. 2).



Р и с. 2. Схема возникающих сил напряжения почвенного пласта при движении скобы почвообрабатывающего рабочего органа
F i g. 2. Scheme of the soil layer stress from the moving of the bracket-shaped soil tillage working body

В этом случае суммарная сила напряжения в почвенном пласте может быть определена из выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \frac{1}{l^2} (R_1 \cdot f_1 + R_2 \cdot f_2 + \dots + R_n \cdot f_n) = \\ &= \frac{1}{l^2} \sum_{i=1}^n R_i \cdot f_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где $f = \frac{\rho}{l}$ – коэффициент; ρ – расстояние от точки приложения i – той силы до центра концентрации напряжений, м; l – глубина формирования сил напряжений в почвенном пласте, м.

Скобообразный почвообрабатывающий рабочий орган, в отличие от типовых рабочих органов, которые разрушают связи между отдельными структурными агрегатами почвы, позволяет разрыхлить и раскрошить почву сжатием при условии нарастания интенсивности ее

деформации, создавая концентрацию напряжений.

В этой связи суммарная сила сжатия пласта почвы зависит от ширины l_d зоны деформации почвенного пласта, твердости почвы, скорости перемещения, площади фронтальной проекции и обтекаемости рабочего органа.

В общем случае суммарная сила сжатия почвенного пласта рабочим органом может быть представлена следующей зависимостью:

$$F_t = f(T, V_w, F), \quad (3)$$

где T – твердость почвенного пласта, кг/см²; V_p – скорость перемещения рабочего органа, м/с; F – площадь фронтальной проекции рабочего органа, см².

Площадь фронтальной проекции F рабочего органа зависит от ширины l_d зоны деформации почвенного пласта и глубины обработки почвы. Чем меньше глубина обработки h_{sm} и ширина l_d зоны деформации почвы, тем меньше значение F .

В формуле (3) при фиксированном значении глубины обработки значение $F = \text{const}$, а твердость T почвенного пласта и скорость V_p перемещения рабочего органа являются случайными величинами в вероятностно-статистическом смысле.

Вместе с тем при функционировании рабочего органа только скорость его перемещения V_p является управляемым параметром.

С учетом выражения (3) суммарная сила сжатия почвенного пласта скобообразным рабочим органом может быть рассчитана следующей зависимостью:

$$F_t^\Sigma = 0,5C_p K_d T V_w^2 F, \quad (4)$$

где $C_p = 9,81$ – поправочный коэффициент [25]; K_d – коэффициент террадинамического сопротивления рабочего органа, учитывающий обтекаемость

рабочих органов и зависящий от формы поверхности рабочего органа и твердости почвы.

В формуле (4) произведение $T V_p^2$ представляет скорость напора P_d (или динамическое давление) на почвообрабатывающий рабочий орган. Обозначая $P_d = 0,5 T V_p^2$ и подставив в выражение (3) примет вид:

$$F_t^\Sigma = 0,5 C_p K_d F P_d. \quad (5)$$

С учетом выражения (2) при фиксированных значениях твердости почвенного пласта T и площади фронтальной проекции F рабочего органа суммарная сила сжатия почвенного пласта рабочим органом представляет собой произвольную дифференцируемую функцию $F_t^\Sigma = f(P_d)$.

Так как твердость почвы T и скорость V_p перемещения рабочего органа являются непрерывными случайными величинами, то скорость напора P_d также имеет вероятностный характер.

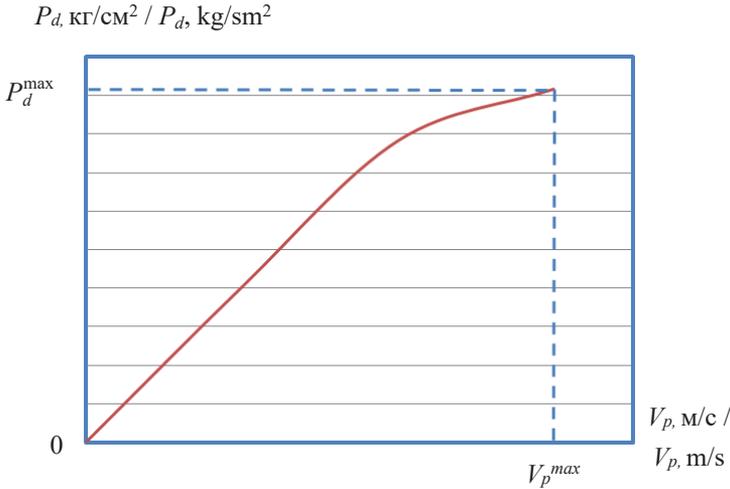
Детерминированная функция $P_d = f(V_p)$ представляет собой кривую второго порядка типа (при $x \geq 0$, рис. 3):

$$y = bx^2, \quad (6)$$

где $b = T$ – угловой коэффициент, равный значению твердости почвы на обрабатываемом агрофоне; $x = V_p$ – аргумент функции (6); P_d^{\max} – максимальное значение скорости напора (или динамического давления (рис. 3), кг/см²; V_p^{\max} – максимальное значение скорости перемещения рабочего органа (рис. 3), м/с.

С учетом выражений (4) и (6) математическое ожидание суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом можно определить с помощью соотношения:

$$M(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi(x) dx, \quad (7)$$



Р и с. 3. Схема к определению скорости напора P_d (динамического давления) на рабочий орган
 F i g. 3. Scheme for determining the speed of pressure P_d on the working body

где $\varphi(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} \exp \left[-\frac{(x - m)^2}{2\sigma_x^2} \right]$,
 $f(x) = bV_p^2$ – плотность распределения вероятностей случайной величины x ;
 m, σ_x – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение величины x .

С учетом выражений (6) и (7) получим:

$$M(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x) dx = \frac{1}{\sigma_{V_p} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (bV_p^2) e^{-\frac{(V_p - \bar{V}_p)^2}{2\sigma_{V_p}^2}} dV_p. \quad (8)$$

Решая интегральное выражение (8), окончательно получим формулу для определения математического ожидания (или среднего значения) суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом:

$$F_t^\Sigma = 0,5C_p K_d F P_d = 0,5C_p K_d F \left[bV_p^2 (1 + v_{V_p}^2) \right], \quad (9)$$

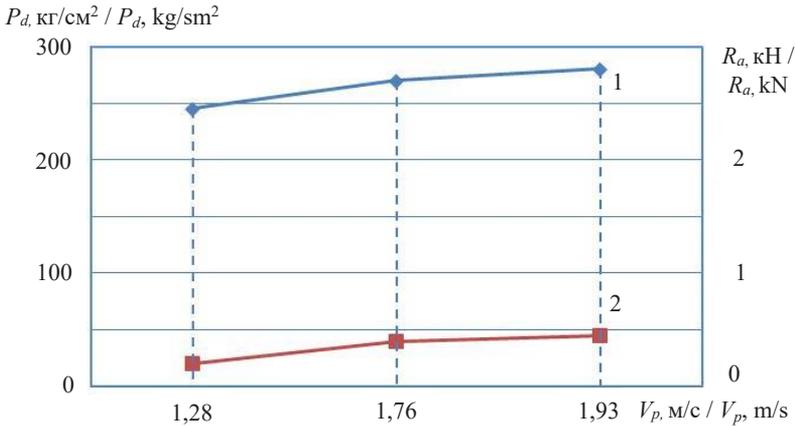
где F – площадь фронтальной проекции
Agricultural engineering

рабочего органа, см^2 ; V_p – скорость перемещения рабочего органа, м/с ; $v_{V_p} = \frac{\sigma_{V_p}}{\bar{V}_p}$ – коэффициент вариации скорости перемещения рабочего органа; σ_{V_p} – среднее квадратическое отклонение скорости перемещения рабочего органа, м/с ; \bar{V}_p – среднее значение скорости перемещения рабочего органа, м/с .

На основании проведения теоретических расчетов были получены зависимости скорости напора, тягового сопротивления и суммарной силы сжатия почвенного пласта от скорости перемещения рабочего органа.

На рисунке 4 представлены графические зависимости тягового сопротивления R_a рабочего органа и скорости напора P_d на рабочий орган от скорости его перемещения.

Анализ полученных результатов исследований показывал, что с повышением скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с скорость напора P_d на рабочий орган увеличивается с 247 до 276 кг/см^2 , при этом тяговое сопротивление рабочего органа R_a возрастает от 2,47 до 2,7 кН .



Р и с. 4. Зависимости тягового сопротивления R_a (кривая 1) и скорости напора P_d (кривая 2) от скорости V_p перемещения рабочего органа (агрофон – вспаханное поле после зерновых, глубина обработки почвы $h = 20$ см)

F i g. 4. Dependencies of the traction resistance R_a (curve 1) and the pressure velocity P_d (curve 2) on the working body on the speed of its movement (agrobground – a plowed field after harvesting grains, tillage depth $h = 20$ cm)

Согласно полученным данным были выявлены закономерности изменения динамического давления P_d и тягового сопротивления R_a рабочего органа от скорости его перемещения, которые описываются следующими моделями:

$$P_d = 0,094944V_p^2 + 0,006747V_p - 0,01853, \quad (10)$$

$$R_a = 4,20750V_p^2 - 36,24550V_p + 324,67360. \quad (11)$$

С использованием формулы (9) была установлена суммарная сила сжатия почвенного пласта рабочим органом при различных скоростях его перемещения и средней глубине обработки почвы 20 см.

На рисунке 5 показана зависимость суммарной силы сжатия F_t почвенного пласта рабочим органом от его скорости перемещения.

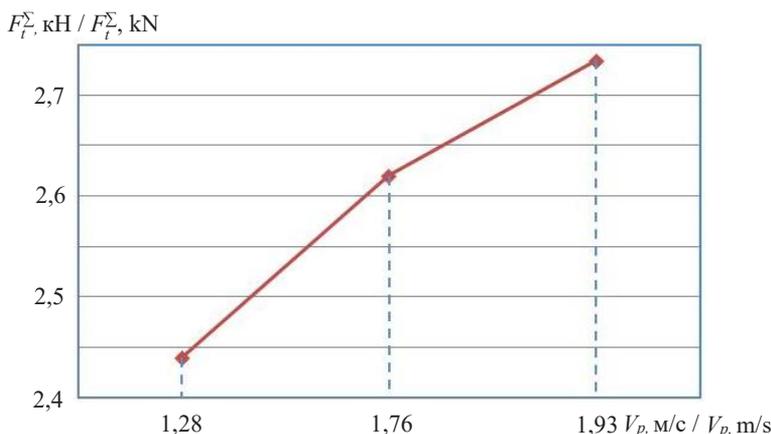
Полученные данные позволили установить закономерность изменения суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом при скорости его перемещения V_p от 1,28 до 1,93 м/с, которая описывается следующей зависимостью:

$$\bar{F}_t^{\Sigma} = 34,99390V_p^2 - 277,69185V_p + 2980,36561. \quad (12)$$

С повышением скоростного режима работы рабочего органа наблюдается увеличение суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом от 2,44 до 2,74 кН.

Установлена разная динамика изменения тягового сопротивления R_a рабочего органа, динамического давления P_d и суммарной силы F_t сжатия почвенного пласта рабочим органом при повышении скорости V_p его перемещения. Так, при увеличении скорости от 1,28 до 1,93 м/с суммарная сила F_t сжатия почвенного пласта рабочим органом возрастает на 11–12 %, а скорость напора P_d повышается на 127,3 %.

Сила сжатия почвенного пласта рабочим органом значительно зависит от твердости почвы, площади фронтальной проекции рабочего органа и его обтекаемости, скорости его перемещения и динамического давления на него.



Р и с. 5. Зависимость среднего значения суммарной силы сжатия почвенного пласта F_t^Σ рабочим органом от скорости его перемещения (агрофон – вспаханное поле после зерновых, глубина обработки почвы $h = 20$ см)

F i g. 5. Dependence of the average value of the total force of compression of the soil layer F_t^Σ by the working body on its speed of movement (agrobackground – a plowed field after harvesting grains, the depth of tillage $h = 20$ cm)

Время прохождения почвенного пласта через скобу рабочего органа можно определить из формулы:

$$t_{sl} = \frac{b_{sl}}{V_p}, \quad (13)$$

где b_{sl} – ширина зоны деформации почвенного пласта (равна ширине скобы рабочего органа), м; V_p – скорость перемещения рабочего органа, м/с.

В пределах изменения скорости перемещения предлагаемого рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с, время прохождения почвенного пласта варьирует в пределах $t_{sl} = 0,0414 - 0,0625$ с.

Потребная мощность на сжатие почвенного пласта рабочим органом определяется из выражения:

$$N_p = 10^{-3} F_t^\Sigma \frac{b_{sl}}{t_{sl}}, \quad (14)$$

где F_t^Σ – суммарная сила сжатия почвенного пласта скобой рабочего органа, Н.

На рисунке 6 представлена зависимость потребной мощности N_p на сжатие почвенного пласта рабочим органом от скорости его перемещения.

При повышении скорости V_p перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с мощность затрачиваемая на сжатие почвенного пласта увеличивается от 3,12 до 5,3 кВт.

Выявлена закономерность изменения потребной мощности N_p на сжатие почвенного пласта рабочим органом от скорости его перемещения, которая описывается зависимостью:

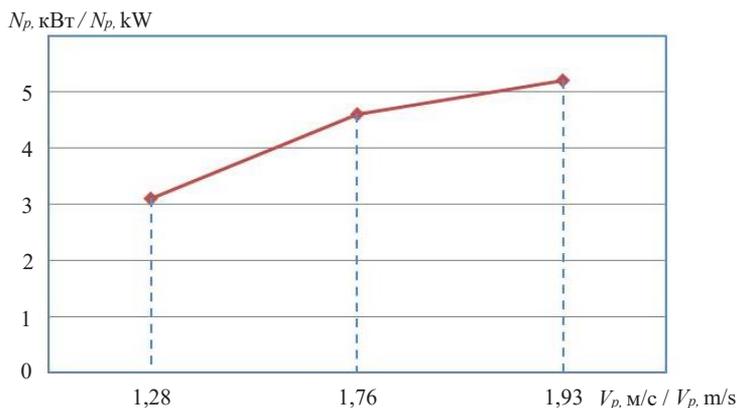
$$N_p = 1,22360V_p^2 - 0,57393V_p + 1,84987. \quad (15)$$

Зависимость справедлива в диапазоне изменения скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с при глубине обработки почвы 20 см.

Энергия J_p , необходимая для сжатия почвенного пласта рабочим органом, определяется из формулы:

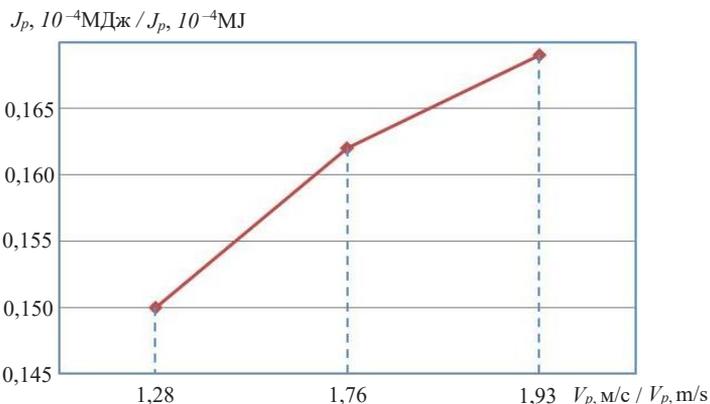
$$J_p = 10^{-3} F_t^\Sigma V_p \frac{b_{sl}}{t_{sl}}. \quad (16)$$

На рисунке 7 представлена зависимость изменения энергии от скорости перемещения рабочего органа при сжатии почвенного пласта.



Р и с. 6. Зависимость потребляемой мощности N_p на сжатие почвенного пласта рабочим органом от скорости его перемещения

F i g. 6. Dependence of the required power N_p spent on the compression of the soil layer by the working body on the speed of its movement



Р и с. 7. Зависимость изменения энергии J_p от скорости перемещения рабочего органа при сжатии почвенного пласта

F i g. 7. Dependence of the amount of energy J_p , spent on the compression of the soil layer by the working body on the speed of its movement

В интервале изменения скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с количество энергии J_p , затрачиваемое на сжатие почвенного пласта рабочим органом, увеличивается от $0,150 \cdot 10^{-4}$ до $0,169 \cdot 10^{-4}$ МДж.

На основании выявленной зависимости получено математическое выражение изменения количества энергии от скорости перемещения рабочего органа при сжатии почвенного пласта:

$$J_p = (0,024887V_p^2 - 0,05066V_p + 0,17407) \cdot 10^{-4}. \quad (17)$$

Зависимость справедлива в диапазоне изменения скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с при глубине обработки почвы 20 см.

Анализ представленных математических моделей и выявленных закономерностей разработанного скобообразного рабочего органа позволяет

заклЮчить, что обработка почвы становится эффективной при концентрации напряжений в обрабатываемом пласте с рабочими органами замкнутого контура с определенными конструктивными параметрами.

Обсуждение и заключение

Разработанные математические модели расширяют теоретические и практические знания о процессах обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте.

Предложенные модели позволяют определить напряжение в почвенном пласте от действия группы сил в профиле скобы рабочего органа, среднее значение суммарной силы сжатия почвенного пласта, время прохождения почвенного

пласта через рабочий орган, требуемую мощность сжатия почвенного пласта и количество энергии, затрачиваемой на сжатие почвенного пласта рабочим органом.

Установлены закономерности изменения динамического давления, тягового сопротивления, суммарной силы, потребной мощности и энергии сжатия почвенного пласта от скорости перемещения рабочего органа.

Описанные математические модели и выявленные закономерности изменения параметров процесса обработки почвы рабочим органом замкнутого контура в дальнейшем позволят разработать новые эффективные рабочие органы и оптимизировать конструктивно-технологические параметры и режимы их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Принципы создания и испытания конкурентоспособной почвообрабатывающей техники / Н. К. Мазитов [и др.] // Техніка і технології АПК. Киев. 2014. № 4 (55). С.14–19.
2. Ветохин В. И. Модель крошения почвы под действием клина // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1994. № 10. С. 25–27. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34175833> (дата обращения: 29.12.2022).
3. Ресурсосберегающая техника для возделывания зерновых культур / В. В. Бледных [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 3. С. 19–22. EDN: [IATTWV](#)
4. Валиев А. Р., Мухамадьяров Ф. Ф., Зиганшин Б. Г. Обоснование конструктивно-технологических параметров нового дискового культиватора // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 58–61. EDN: [XTDNZB](#)
5. Мударисов С. Г. Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27–30. EDN: [ROJUVN](#)
6. Рахимов З. С., Рахимов И. Р., Файрушин, Д. З. Универсальные орудия для безотвальной обработки почвы // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 5. С. 10–11. EDN: [UUNCHX](#)
7. Итоги многолетних сравнительных испытаний и внедрения новой техники для обработки почвы и посева / Н. К. Мазитов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30, № 8. С. 91–93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/itogi-mnogoletnih-sravnitelnyh-ispytaniy-i-vnedreniya-novoy-tehniki-dlya-obrabotki-pochvy-i-poseva/viewer> (дата обращения: 30.12.2022).
8. Рабочий орган для рыхления почвы : патент 2453087 Российская Федерация / Джаббаров Н. И., Добринов А. В. [и др.]. № 2010 128 168; заявл. 07.07.2010; опубл. 20.06.2012. 6 с.
9. Бледных В. В., Свечников П. Г. Крошение почвы корпусом отвального плуга // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. 2013. Т. 65. С. 68–73. EDN: [RSCPQV](#)
10. Маслов Г. Г. Конструктивные особенности нового чизельного комбинированного агрегата и расчет потребной мощности двигателя на его работу // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 109. С. 195–207. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konstruktivnyye-osobennosti-novogo-chizelnogo-kombinirovannogo-agregata-i-raschet-potrebnoy-moschnosti-dvigatelya-na-ego-rabotu/viewer> (дата обращения: 30.12.2022).

11. Шовкопляс А. В. Теоретическое обоснование формы рабочего органа // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 4 (14). С. 90–96. EDN: [VJKDIN](#)
12. Бледных В. В., Свечников П. Г., Трояновская И. П. Расчетная схема технологического процесса крошения почвы почвообрабатывающими рабочими органами // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 3. С. 22–26. EDN: [WYOOWX](#)
13. Бартенев И. М. Ударное разрушение и активный оборот почвенного пласта при вспашке // Лесотехнический журнал. 2013. № 1 (9). С. 98–110. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/udarnoe-razrushenie-i-aktivnyy-oborot-pochvennogo-plasta-pri-vspashke/viewer> (дата обращения: 23.12.2022).
14. Джабборов Н. И., Сафаров М., Миракилов Дж. Разработка овалообразного рабочего органа и его параметров для поверхностной обработки почвы // Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 1 (27). С. 48–52. EDN: [RPCIQB](#)
15. Шовкопляс А. В. Обоснование конструктивно-технологических параметров энергоэффективного ножа почвенной фрезы // Научный вестник государственного образовательного учреждения Луганской Народной Республики «Луганский национальный аграрный университет». 2020. № 8-3. С. 22–26. EDN: [NHWOLG](#)
16. Результаты полевых исследований почвообрабатывающего орудия с эллипсоидными дисками / Ф. Ф. Яруллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № 2 (53). С. 123–127. https://doi.org/10.12737/article_5d3e17361cada0.88786874
17. Разработка комбинированного рабочего органа для послонной безотвальной обработки почвы / И. В. Божко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 3–6. EDN: [XSNUWN](#)
18. Санжаровская М. И. Что лучше раскрошит комок почвы // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2009. № 1. С. 236. EDN: [JXBSTJ](#)
19. Старовойтов С. И., Старовойтова Н. П., Чемисов Н. Н. О крошении суглинистой почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 30–34. EDN: [SIWANX](#)
20. Алдошин Н. В., Васильев А. С., Голубев В. В. Исследование пределов прочности почвы на сжатие и растяжение // Агроинженерия. 2020. № 3 (97). С. 27–33. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-27-33>
21. Щириков В. Н., Пархоменко Г. Г. Проектирование рабочих органов для рыхления почвы с использованием деформации растяжения // Вестник АПК Ставрополя. 2016. № 3 (23). С. 57–62. EDN: [XCCEZD](#)
22. Бартенев И. М. Выбор вида деформации и типа деформатора обработки сухих твердых почв // Лесотехнический журнал. 2018. № 3 (31). С. 162–170. https://doi.org/10.12737/article_5b97a15e471834.37136442
23. Dzhaborov N., Dobrinov A., Sergeev A. Vibration Parameters and Indicators of a Dynamic Tillage Tool // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 032048, AFE 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032048>
24. Рабочий орган для рыхления почвы : патент 2755317 Российская Федерация / Джабборов Н. И., Добринов А. В. [и др.]. № 2021106319; заявл. 11.03.2021 ; опубл. 15.09.2021. 7 с.
25. Dzhaborov N. I., Dobrinov A. V., Sergeev A. V. The Basics for Choosing Energy-Efficient Working Tools of Tillage Machines // Nexo Revista Científica. 2022. Vol. 35, Núm. 02 P. 498–516. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14626>
26. Дьяков В. П. Зависимость сопротивления почвы от скорости сжатия // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 2. С. 9–11. EDN: [WNRQBP](#)

Поступила 09.01.2023; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 16.03.2023

Об авторах:

Джабборов Нозим Исмонлович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного

агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское шоссе, 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 Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Н. И. Джабборов – научное руководство; формулирование концепции решения; постановка задачи; проведение исследований; анализ результатов исследования.

А. В. Добринов – формирование структуры статьи; анализ литературных данных; обработка данных; разработка и доработка решения.

А. П. Савельев – определение методологии исследования; критический анализ результатов исследования; составление выводов и заключения; доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mazytov N., Lobachevskyy Ya., Sharafyev L., Sadriyev F., Bahmanov R., Rakhimov I., et al. Principles of Construction and Testing of Competitive Tillage Equipment. *Tekhnika i tekhnologii APK*. 2014;(4):14–19. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Vetokhin V.I. [Model of Soil Crumbling Under the Action of a Wedge]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny*. 1994;(10):25–27. (In Russ.)
3. Blednykh V.V., Mazitov N.K., Rakhimov R.S., et al. Resource-Sparing Technical Means for Cultivation of Grain Crops. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. 2007;(3):19–22. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: IATTWV
4. Valiev A.R., Muhamadyarov F.F., Ziganshin B.G. Substantiation of Constructive and Technological Parameters of a New Disc Harrow. *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*. 2017;(1):58–61. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XTDNZB
5. Mudarisov S.G. [Modeling the Process of Interaction of Working Bodies with Soil]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny*. 2005;(7):27–30. (In Russ.) EDN: ROJUVN
6. Rakhimov Z.S., Rakhimov I.R., Fayrushin D.Z. [Universal Tools for Non-Moldboard Tillage]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny*. 2004;(5):10–11. (In Russ.) EDN: UUHCHX
7. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Lobachevski Y.P., et al. Results of Long-Term Comparative Tests of New Equipment for Soil Cultivation and Sowing. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2016;30(8):91–93. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/itogi-mnogoletnih-sravnitelnyh-ispytaniy-i-vnedreniya-novoy-tehniki-dlya-obrabotki-pochvy-i-poseva/viewer> (accessed 30.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., et al. [Working Body for Loosening the Soil]. Patent 2,453,087 Russian Federation. 2012 June 20. (In Russ.)
9. Blednykh V.V., Svechnikov P.G. [Soil Crumbling by the Body of a Moldboard Plow]. *Bulletin of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy*. 2013; 65:68–73. (In Russ.) EDN: RSCPQV

10. Maslov G.G. Design Features of the New Chisel Combined and Calculation Needs of the Engine Power at His Work. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. 2015;(109):195–207. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/13.pdf> (accessed 30.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Shovkoplyas A.V. [Theoretical Substantiation of the Form of the Working Body]. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve*. 2015;(4):90–96. (In Russ.) EDN: **VJKDIN**
12. Blednykh V.V., Svechnikov P.G., Troyanovskaya I.P. Calculation Model of Technological Process of Soil Crumbling by Means of Tillage Working Organs. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;83(3):22–26. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66132>
13. Bartenev I.M. [Impact Destruction and Active Turnover of the Soil Layer during Plowing]. *Forestry Engineering Journal*. 2013;(9):98–110. Available at: http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/098-110.pdf (accessed 23.12.2022). (In Russ.)
14. Jabborov N., Safarov M., Mirakilov J. Basis of Parameters of the Working Organ of Combined Machine Km-2.4 for Soil Cultivating. *Doklady Tadzhijskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2011;(1):48–52. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **RPCIQB**
15. Shovkoplyas A.V. Justification of Design and Technological Parameters of an Energy-Efficient Soil Cutter Knife. *Nauchnyi vestnik GOU LNR "Luganskii natsional'nyi agrarnyi universitet"*. 2020;3(8):22–26. Available at: <http://lnau.su/wp-content/uploads/2020/12/vestnik-gou-lnr-lnau-№8-tom-3-2020.pdf> (accessed 23.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Yarullin F.F., Ibyatov R.I., Yakhin S.M., Gaynutdinov R.K. Results of Field Studies of Soil-Tillage Tools with Ellipsoid Disks. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2019;14(2):123–127. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.12737/article_5d3e17361cada0.88786874
17. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Gromakov A.V., Kambulov S.I., Rykov V.B. Development of a Combined Working Body for Layer-By-Layer Non-moldboard Tillage. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;83(8):3–6. Available at: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/66172/pdf> (accessed 23.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Sanzharovskaya M.I. [What is Better to Crumble a Lump of Soil]. *Engineering and Technical Support of the APK*. 2009;(1):236. (In Russ.) EDN: **JXBSTJ**
19. Starovoytov S.I., Starovoytova N.P., Chemisov N.N. About Crumbling of the Loamy Soil. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;(3):30–34. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **SIWANX**
20. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Studies on Compressive and Tensile Strength of the Sod-Podzolic Soil. *Agricultural Engineering*. 2020;(3):27–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-27-33>
21. Shchirov V.N., Parhomenko G.G. Designing of the of Working Bodies for Loosening Soil Using the Deformation Tensile. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2016;(3):57–62. Available at: <http://www.vapk26.ru/journals/23.pdf> (accessed 23.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Bartenev I.M. The Choice of the Type of Deformation and the Type of Deformer Processing Dry Solids. 2019;8(3):162–170. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.12737/article_5b97a15e471834.37136442
23. Dzhabborov N., Dobrinov A., Sergeev A. Vibration Parameters and Indicators of a Dynamic Tillage Tool. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;937:032048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032048>
24. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., et al. [Working Body for Loosening the Soil]. Patent 2,755,317 Russian Federation. 2021 September 15. 7 p. (In Russ.)
25. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Sergeev A.V. The Basics for Choosing Energy-Efficient Working Tools of Tillage Machines. *Nexo Revista Cientifica*. 2022;35(02):498–516. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14626>
26. Dyakov V.P. Dependence of Soil Resistance on the Rate of Compression. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. 2011;(2):9–11. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WNRQBP**

Submitted 09.01.2023; revised 06.03.2023; accepted 16.03.2023



About the authors:

Nozim I. Dzhabborov, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Leading Researcher, 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, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: [A-7780-2019](https://orcid.org/0000-0001-8910-2625), nozimjon-59@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Senior Researcher, 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, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: [AAC-9655-2020](https://orcid.org/0000-0002-3242-1235), a.v.dobrinov@yandex.ru

Anatoliy P. Saveluev, Dr.Sci. (Engr.), 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](https://orcid.org/0000-0003-0361-0827), tbsap52@mail.ru

Author contribution:

N. I. Jabborov – scientific guidance; formulation of the concept of solution; problem statement; research; analysis of research results.

A. V. Dobrinov – developing the structure of the article; analyzing literature data; data processing; developing and improving the solution.

A. P. Saveluev – determination of the research methodology; critical analysis of the research results; drawing up the conclusions; finalizing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.436:62-531.9

doi: 10.15507/2658-4123.033.202302.192-206

Оригинальная статья



Оперативный контроль мощностных показателей дизельных двигателей с топливной системой типа Common Rail

Ф. Р. Сафин¹, Р. М. Баширов¹, А. В. Неговора¹✉,
С. К. Корабельников², Н. В. Раков³

¹ Башкирский государственный аграрный университет
(г. Уфа, Российская Федерация)

² Академия транспортных технологий
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

³ Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет (г. Саранск,
Российская Федерация)

✉ negira@rambler.ru

Аннотация

Введение. Для условий эксплуатации автотракторной техники особый интерес представляют оперативные методы контроля мощностных показателей двигателей с целью непрерывного диагностирования их технического состояния. Методы характеризуются механическим КПД, определяемым в условиях ремонтных мастерских с использованием сложных тормозных устройств.

Цель статьи. Представить результаты исследования по разработке оперативного метода определения механического КПД дизельных двигателей с аккумуляторными электронно-управляемыми системами топливоподачи.

Материалы и методы. Башкирским ГАУ предложен и успешно апробирован оперативный метод оценки технического состояния дизельных двигателей с топливной аппаратурой непосредственного действия по механическому КПД, при котором он определяется по показателям работы их топливной аппаратуры, отрегулированной с использованием самого дизеля в качестве регулировочного стенда. В дальнейшем исследована возможность применения данного метода в дизельных двигателях с аккумуляторными топливными системами.

Результаты исследования. На точность определения механического КПД дизельных двигателей, электронно-управляемых топливными системами аккумуляторного типа, могут повлиять особенности их работы – корректирование цикловых подач электронным блоком управления двигателем в зависимости от технического состояния цилиндров и высокое давление впрыскивания топлива. Для проверки этой гипотезы проводились исследования на четырехцилиндровом двигателе D4EA 2,0 автомобиля HYUNDAI TUSCON с аккумуляторной топливной системой типа Common Rail.

© Сафин Ф. Р., Баширов Р. М., Неговора А. В., Корабельников С. К., Раков Н. В., 2023



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

Система топливоподачи двигателя была дополнена электронным блоком, встроенным между форсункой и штатным блоком управления двигателем, который осуществлял разрыв линии передачи управляющего сигнала к форсунке по заданному алгоритму без перехода штатного блока в аварийный режим. Установлено, что предложенным методом можно успешно определять техническое состояние двигателя в целом, а также его отдельных цилиндров (чередую отключенные и работающие цилиндры).

Обсуждение и заключение. Предложенный оперативный метод определения механического КПД успешно может использоваться для дизельных двигателей с аккумуляторными электронно-управляемыми системами топливоподачи. При этом увеличение цикловой подачи электронным блоком управления системой топливоподачи двигателем снижает величину механического КПД незначительно, и оно может учитываться лишь в особых случаях.

Ключевые слова: диагностирование оперативное, двигатель дизельный, система топливоподающая, показатели мощностные, КПД механический

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают благодарность руководителю центра по ремонту топливной аппаратуры Bosch Diesel Service ООО «Башдизель» за предоставленные образцы электроуправляемых форсунок и оборудование для испытания, а также анонимным рецензентам за указанные замечания к статье, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования: Оперативный контроль мощностных показателей дизельных двигателей с топливной системой типа Common Rail / Ф. Р. Сафин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 192–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.192-206>

Original article

Operational Control of Power Indicators of Diesel Engines with Common Rail Fuel System

F. R. Safin^a, R. M. Bashirov^a, A. V. Negovora^a ,

S. K. Korabelnikov^b, N. V. Rakov^c

^a Bashkir State Agrarian University (Ufa, Russian Federation)

^b Academy of Transport Technologies

(Saint Petersburg, Russian Federation)

^c National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

 negira@rambler.ru

Abstract

Introduction. Operational methods to monitor the power indicators of engines for continuous diagnosis of their technical condition are of particular interest for creating optimal operating conditions of motor and tractor machinery. The methods are characterized by the mechanical efficiency, determined in the conditions of repair shops with the use of complex braking devices.

Aim of the Article. To present the results of research on the development of an operational method for determining the mechanical efficiency of diesel engines with battery-operated electronically controlled fuel supply systems.

Materials and Methods. The Bashkir State Agrarian University proposed and successfully tested an operational method for assessing the technical condition of diesel engines with direct-acting fuel equipment on their mechanical efficiency, which is determined by the performance of their fuel equipment adjusted using the diesel itself as an adjusting stand.

The possibility of using the proposed method for diesel engines with storage fuel systems was investigated.

Results. The accuracy of determining the mechanical efficiency of diesel engines by electronically controlled fuel systems of battery type can be affected by the features of their work – the correction of cyclic feeds by the electronic engine control unit depending on the technical condition of the cylinders and high fuel injection pressure. To test this hypothesis, there were carried out studies on a four-cylinder D4EA 2.0 engine of a Hyundai Tuscon car with a Common Rail type storage fuel system. The engine fuel supply system was supplemented with an electronic unit integrated between the injector and the standard engine control unit, which interrupted the transmission line of the control signal to the injector according to a given algorithm without the standard unit transition to emergency mode. It has been found that the proposed method can successfully determine the technical condition of the engine as a whole and of its individual cylinders (alternating disabled and working cylinders).

Discussion and Conclusion. The proposed operational method for determining the mechanical efficiency can be successfully used for diesel engines with accumulator electronically controlled fuel supply systems. At the same time, an increase in the cyclic supply by the electronic control unit of the engine fuel supply system reduces the mechanical efficiency slightly, and it can be taken into account only in special cases.

Keywords: operational diagnostics, diesel engine, fuel supply system, power indicators, mechanical efficiency

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

Acknowledgments: The authors wish to thank the head of the Bosch Diesel Service LLC Bashdiesel center for providing samples of electrically controlled injectors and equipment for testing. The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

For citation: Safin F.R., Bashirov R.M., Negovora A.V., Korabelnikov S.K., Rakov N.V. Operational Control of Power Indicators of Diesel Engines with Common Rail Fuel System. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):192–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.192-206>

Введение

К настоящему времени около половины себестоимости продукции растениеводства в АПК приходится на энергозатраты при ее производстве и дальнейшем транспортировании. В сельскохозяйственном производстве основным источником энергии стали дизельные двигатели (далее дизели), устанавливаемые на автомобили, тракторы, комбайны и многие стационарные агрегаты. По топливной экономичности, надежности, экологичности они существенно превосходят бензиновые двигатели [1–4]. Проблема снижения энергоемкости сельскохозяйственного производства может решаться дальнейшим повышением работоспособности и топливной экономичности дизелей.

Количество потребляемого дизелями топлива зависит от их технического

состояния, ухудшающегося по мере эксплуатации. Это состояние диагностируется и восстанавливается при техническом обслуживании и ремонте [5–7]. Техническое состояние дизелей диагностируют по результатам их испытаний в условиях мастерских с использованием сложных тормозных стендов. Обусловленная этим необходимостью выполнения большого объема демонтажных, транспортных и монтажных работ затрудняет своевременное восстановление их технического состояния.

В процессе эксплуатации не могут применяться сложные тормозные устройства. Их диагностируют с использованием трудно и субъективно определяемых косвенных параметров технического состояния – мощности и расхода топлива. Дизели, «показавшиеся» по этим параметрам изношенными, направляются

на ремонт, а уже в мастерских выявляется, что многие из них и не нуждаются в нем – восстанавливаются регулировкой их отдельных механизмов и систем, причем в большинстве случаев их топливной аппаратуры (ТА). Однако из-за отсутствия применимых в условиях эксплуатации простых регулировочных стенов ТА приходится снимать с дизеля и везти в мастерские, что существенно повышает сроки и стоимость ремонта, вследствие чего на практике данная операция проводится крайне редко.

Обзор литературы

На основе анализа работ И. И. Габитова, Л. В. Грехова, А. В. Гриценко, С. Н. Деянина, Н. С. Ждановского, С. Н. Кривцова, В. М. Михлина, С. Н. Ольшевского, Б. Н. Файнлейба и промышленных образцов заводов НЗТА, ЯЗТА, Robert Bosch, Denso, Delphi выявлен ряд эффективных методов определения технического состояния ТА и в целом дизелей.

Авторами установлено, что существующие методы, средства и технологии точной оперативной оценки технического состояния дизелей и их ТА не получили широкого использования. Это связано с тем, что детально не проанализирована зависимость технического состояния дизелей от особенностей функционирования их топливных систем.

Применимый в условиях эксплуатации успешным оказался предложенный Башкирским ГАУ метод оперативного диагностирования и регулирования ТА, заключающийся в использовании самого дизеля в качестве регулировочного стенда при его работе без нагрузки на номинальной частоте вращения с пропуском впрысков топлива в отдельные цилиндры для обеспечения номинальной цикловой подачи топлива в других цилиндрах [2]. Особенностью метода [8; 9] является возможность по результатам регулирования ТА определить механический КПД дизеля, представляющий собой отношение эффективной мощности к индикаторной,

который можно определить по одному из следующих выражений:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_e}{N_e + N_m} = \frac{N_i - N_m}{N_i}, \quad (1)$$

где $N_{i(e,m)}$ – мощности индикаторная (i), эффективная (e) и механических потерь (m).

Механический КПД показывает, какая доля вырабатываемой дизелем индикаторной мощности используется для совершения полезной работы. У современных четырехтактных дизелей механический КПД доходит до 0,70–0,88 (0,70–0,80 в дизелях без наддува и 0,78–0,88 – с наддувом) [2]. Зависит он не только от внутренних механических потерь (N_m), но и от внутренних тепловых (N_i) потерь энергии дизеля. Отсюда следует, что для повышения точности определения механического КПД дизелей следует предварительно тщательно отрегулировать все его системы и механизмы, особенно топливную систему, работа которой наиболее явно влияет на индикаторную мощность. При этом выбор типа системы топливоподачи (непосредственного или аккумуляторного) по-своему влияет на выбор того или иного метода диагностирования [10–15].

Материалы и методы

Разработанный в Башкирском ГАУ метод оперативной оценки механического КПД двигателя внутреннего сгорания успешно прошел испытания на дизелях с ТА непосредственного действия [16; 17]. Особенностью метода является то, что механический КПД определяется как отношение количества впрысков пропущенных на холостом ходу и полных впрысков на номинальном режиме работы дизеля

$$\eta_m = \frac{\chi - \gamma}{\chi} = \frac{z}{\chi}, \quad (2)$$

где γ и z и χ – числа впрысков, реализованных ($\gamma = \chi - z$) и пропущенных на

холостом ходу и полных впрысков на номинальном режиме работы дизеля.

Из приведенного выражения получается, что механический КПД вычисляется по расходам топлива. Это оказывается возможным благодаря тому, что в предложенном методе реализована возможность работы двигателя без нагрузки с имитацией номинального режима работы, т. е. максимальной подачи топлива в часть цилиндров. Количество впрысков на номинальном режиме работы дизеля определяется расчетно, а на холостом ходу – экспериментально. Техническое состояние дизеля тем лучше, чем меньше количество впрысков на холостом ходу.

Для определения количества работающих цилиндров дизеля на холостом ходу предложено следующее выражение:

$$i_{ppx} = (1 - \eta_m) \cdot i, \quad (3)$$

где i – общее число цилиндров дизеля; i_{ppx} – число работающих цилиндров для обеспечения номинальной частоты вращения без нагрузки.

Для четырехтактных дизелей и встречающихся на практике значений механического КПД (0,70–0,88) по выражению (3) можно определить количество цилиндров, необходимое для обеспечения номинальной частоты вращения без нагрузки. Расчетные данные приведены в таблице 1.

Как видно, количество работающих цилиндров не является целым

числом – в данном случае целые числа соответствуют цилиндрам, работающим без пропуска впрысков, а доли – части впрысков цилиндра, работающего с пропуском впрысков. Получается, что независимо от количества цилиндров у двигателя с частичным пропуском впрысков работает только один, т. е. устройством пропуска впрысков устанавливается только на одну секцию ТА. Само устройство представляет из себя электронно управляемый перепускной клапан, встраиваемый в топливопровод высокого давления, выполненный на основе клапанного узла фирмы Denso [18].

Необходимая для регулирования ТА номинальная частота вращения обеспечивается пропуском впрысков в работающие цилиндры. Секции ТА неработающих цилиндров регулируются при работе их с впрыском топлива в камеру с противодавлением, аналогичным цилиндровому при впрыске топлива. После этого отрегулированные секции ТА устанавливаются на свои места, а секции работавших цилиндров снимаются для регулирования и операции повторяются. Определенный по выражению (2) механический КПД при первом этапе характеризует техническое состояние дизеля до регулировки ТА, а при втором – его состояние после регулировки. Разница между ними показывает влияние регулировки ТА на показатели работы дизеля.

Таблица 1
Table 1

Зависимость числа работающих цилиндров i_{ppx} четырехтактных дизелей от их общего количества i и механического КПД η_m
Dependence of the number of operating cylinders i_{ppx} of four-stroke diesel engines on their total number i and mechanical efficiency η_m

Механический КПД η_m / Mechanical efficiency η_m	Число цилиндров / Number of cylinders					
	общее i / general i	1	2	4	6	8
0,70	работающих без нагрузки i_{ppx} / working at idling i_{ppx}	0,30	0,60	1,20	1,80	2,40
0,88		0,12	0,24	0,48	0,72	0,96

Доказано, что точность определения механического КПД возрастает при регулировании ТА с впрыскиванием топлива в камеру с противодавлением (КПВ), меняющимся аналогично таковому в цилиндре дизеля [19–21].

Результаты исследования

В дизелях с аккумуляторной электронно управляемой ТА функцию устройства пропуска впрысков можно возложить на электронный блок управления (ЭБУ) ТА дизеля. При этом на точность определения механического КПД двигателя могут повлиять следующие особенности ЭБУ:

– параметры топливоподачи, в частности цикловые подачи топлива, корректируются по техническому состоянию цилиндров, определяемому по сигналам датчика мгновенной частоты вращения коленчатого вала [22; 23];

– давление впрыскивания топлива существенно выше, чем у ТА непосредственного действия, и влияние противодавления будет незначительно, как следствие, специальная КПВ может не применяться.

Для проверки этих гипотез были проведены исследования на четырехцилиндровом дизеле D4EA 2,0 автомобиля Hyundai Tuscon с аккумуляторной ТА типа Common Rail (фирмы Bosch). Номинальная мощность дизеля 110,3 кВт (при частоте вращения 3800 мин⁻¹), степень сжатия – 17,7, диаметр цилиндра и ход поршня – 83 мм и 92 мм соответственно.

Система топливоподачи опытного дизеля была дополнена электронным блоком 11 (рис. 1), встроенным между форсункой и штатным ЭБУ 12. Основным элементом его является контроллер STM32F407G-DISC1, пропускающий впрыски, разрывом линии передачи сигналов ЭБУ к форсунке.

Алгоритм программы управления дополнительного электронного блока пропуска впрысков приведен на рисунке 2 [24].

Максимально возможная корректировочная доза цикловой подачи топлива, принятой для исследований ТА фирмы Bosch, равна 4 мм³/цикл. Для определения откорректированных значений цикловой подачи использовался диагностический сканер 20 (рис. 1) марки Bosch KTS 540. В ходе экспериментов выявилось, что данный сканер может определять параметры топливоподачи только до частоты вращения 1450 мин⁻¹ коленчатого вала (табл. 2); при большей частоте он не успевает считывать и обновлять информацию. С учетом этого дальнейшие исследования проводились без диагностического сканера.

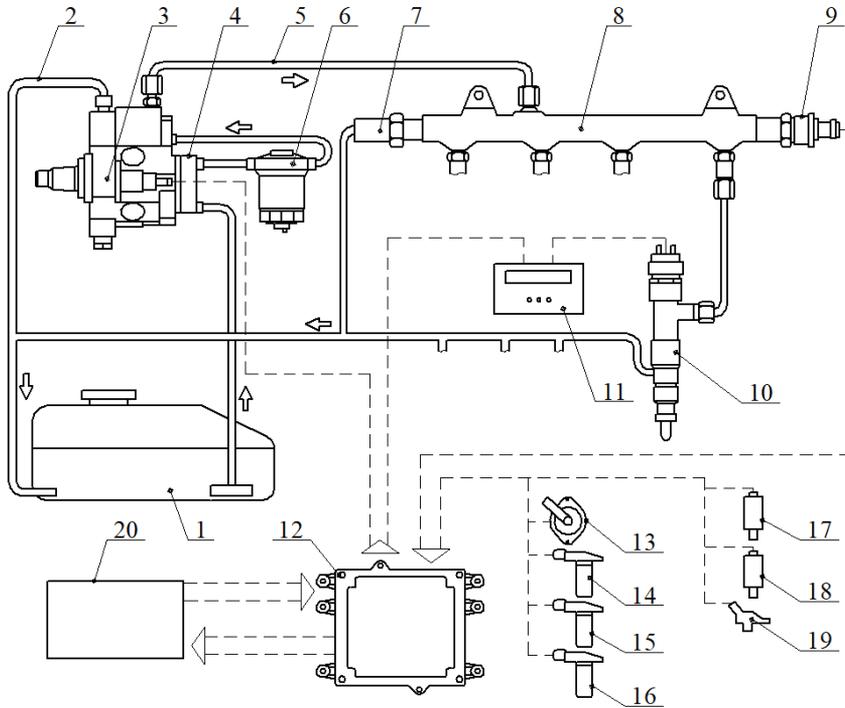
Количество пропускаемых впрысков на холостом ходу определялось при номинальной частоте вращения и полной подаче топлива. Дизель запускался и прогревался при работе на всех цилиндрах (рис. 3). После прогрева три цилиндра отключались (отключением управляющего кабеля форсунок), а номинальная частота вращения устанавливалась пропуском впрысков топлива (через блок 1).

На рисунке 4 условными осциллограммами изображен процесс работы секции ТА с пропуском четырех впрысков из пяти.

Номинальная частота вращения на холостом ходу достигалась при работе на одном цилиндре с 475 пропусками впрысков в него и полным отключением трех цилиндров. Механический КПД при этом составил

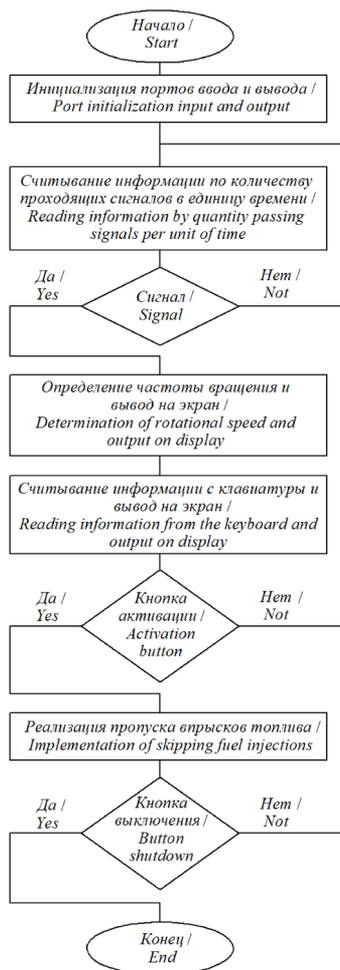
$$\eta_{м} = (1\,900 \cdot 3 + 475) / 7\,600 = 0,813.$$

Влияние корректировки цикловой подачи на механический КПД определялось расчетным путем по часовому расходу топлива при работе дизеля на холостом ходу с номинальными частотой вращения и цикловой подачей топлива. Часовой расход топлива составил $G_{чхх} = 4,4$ кг/ч.



Р и с. 1. Опытная система топливоподдачи типа Common Rail: 1 и 6 – топливный бак и фильтр; 2 и 5 – линии низкого и высокого давления; 3 – топливный насос высокого давления; 4 – насос подкачки; 7 – ограничитель давления; 8 – топливная рамба; 9 и 19 – датчики давления топлива и наддува воздуха; 10 – электронно управляемая форсунка; 11 – электронный блок пропуска впрысков топлива; 12 – ЭБУ; 13, 14 и 15 – датчики положения педали подачи топлива и коленчатого и распределительного валов дизеля; 16, 17 и 18 – датчики скорости и температуры топлива и охлаждающей жидкости; 20 – диагностический сканер

Fig. 1. Experimental Common Rail type fuel supply system: 1 and 6 – fuel tank and filter; 2 and 5 – lines of low and high pressure; 3 – high pressure fuel pump; 4 – boost pump; 7 – pressure limiter; 8 – fuel rail; 9 and 19 – fuel pressure and boost air pressure sensors; 10 – electronically controlled nozzle; 11 – electronic block for skipping fuel injections; 12 – ECU; 13, 14 and 15 – sensors for the position of the fuel supply pedal and the crankshaft and camshaft of the diesel engine; 16, 17 and 18 – speed and temperature sensors for fuel and coolant; 20 – diagnostic scanner



Р и с. 2. Алгоритм программы управления блока пропуска впрысков
 F i g. 2. Algorithm of the control program of the injection skip

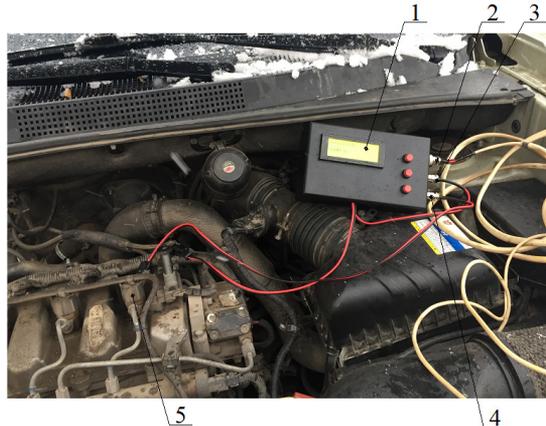
Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

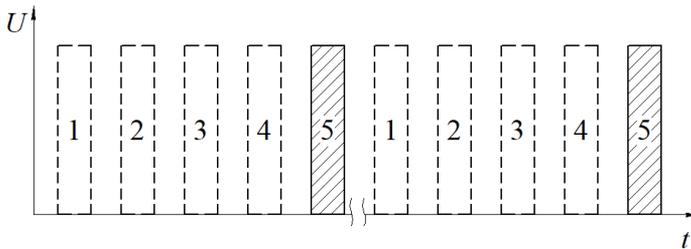
Корректировочные значения цикловых подач при различной частоте вращения коленчатого вала

Correction values of cyclic supply at different crankshaft speeds

Номер цилиндра / Cylinder number	Корректирующий объем топлива, мм ³ /цикл при частоте вращения / Corrective fuel volume, mm ³ /cycle at rotational speed		
	720 мин ⁻¹ (холостой ход) / 720 min ⁻¹ (idling)	1000 мин ⁻¹ / 1000 min ⁻¹	1450 мин ⁻¹ / 1450 min ⁻¹
1	0,07	-0,21	-0,26
2	-0,60	-0,52	-0,59
3	0,26	0,52	0,55
4	0,29	-0,23	-0,20



Р и с. 3. Вид дизеля с установленным в него электронным блоком для диагностики его технического состояния и топливной системы: 1 – электронный блок; 2, 3 и 4 – разъемы питания, входного и выходного сигналов; 5 – электроуправляемая форсунка, работающая с пропуском впрысков топлива
 F i g. 3. Type of diesel engine with an electronic unit installed in it for diagnosing its technical condition and fuel system: 1 – electronic unit; 2, 3 and 4 – connectors for power supply, input and output signals; 5 – electrically controlled nozzle, working with skipping fuel injections



Р и с. 4. Условные осциллограммы сигналов, направляемых ЭБУ к форсунке и не пропущенных встроенным электронным блоком (не заштрихованные столбики) и пропущенных (сплошные заштрихованные): 1–5 – порядковые номера впрысков
 F i g. 4. Conditional oscillograms of signals sent by the ECU to the injector and not passed by the built-in electronic unit (unshaded bars) and missed (solid shaded): 1–5 – sequence numbers of injections

Этому расходу соответствует откорректированная цикловая подача

$$g_{ц.н} = \frac{G_{чхх}}{60 \cdot \gamma \cdot \rho} \cdot 10^9 = \frac{4,4}{60 \cdot (1900 - 475) \cdot 830} \cdot 10^9 = 62,0 \text{ мм}^3/\text{цикл}, \quad (7)$$

где ρ – плотность топлива, кг/м³.

Поскольку некорректированная величина цикловой подачи была меньше на 4 мм³/цикл, т. е. составляла 58 мм³/цикл, то количество реализованных впрысков при работе без корректировки оказалось бы

$$\gamma = \frac{G_{чхх}}{60 \cdot g_{ц.н} \cdot \rho} \cdot 10^9 = \frac{4,4}{60 \cdot 58 \cdot 830} \cdot 10^9 = 1523.$$

При этом количество пропущенных впрысков было бы $z = \chi - \gamma =$

= 7 600 – 1 523=6 077, а механический КПД составил бы $\eta_m = 6\,077/7\,600 = 0,800$.

Получается, что при определении механического КПД без учета коррективировки цикловой подачи погрешность составила

$$\Delta = \frac{0,813 - 0,800}{0,813} \cdot 100 = 1,6 \%$$

Это указывает на то, что механический КПД, в принципе, может

определяться и без учета коррекции, вносимой ЭБУ.

Эксплуатационные показатели работы ТА и дизелей, определенные по итогам регулирования ТА предложенным методом, приведены в таблице 3.

Экспериментально было установлено, что предложенным методом можно определять также техническое состояние отдельных цилиндров, чередуя отключенные и работающие цилиндры.

Таблица 3

Table 3

Эксплуатационные параметры работы электронно управляемой аккумуляторной ТА и дизелей

Operating parameters of electronically controlled storage fuel equipment and diesel engines

№	Наименование параметра / Parameter name	Обозначение / Designation	Единица измерения / Unit of measurement	Выражение (метод) для определения / Expression (method) to define	Результаты испытаний / Test results
Итоги регулирования ТА / Results of regulation of fuel equipment					
Количество впрысков / Number of shots:					
1	на номинальном режиме / in nominal mode	χ		$n \cdot i \cdot \tau$ (расчетный или экспериментальный) / $n \cdot i \cdot \tau$ (calculated or experimental)	7 600
	на холостом ходу / at idle	γ		(экспериментальный) / (experimental)	1 425
	пропущенных на холостом ходу / missed at idle	z		$\chi - \gamma$	6 175
Эксплуатационные параметры работы дизелей / Operating parameters of diesel engines					
2	Часовая производительность ТА (подача топлива) / Hourly productivity of fuel equipment (fuel supply)	G_u	кг/ч	$60 \cdot g_u^* \cdot \chi \cdot \rho^*$	23,47
	Мощность, соответствующая часовой подаче топлива / Power corresponding to the hourly fuel supply	N_T	кВт	$708,6 \cdot g_u \cdot \chi \cdot \rho$	277,1
3					
4	Механический КПД / Mechanical efficiency	η_m		z/χ	0,813

Примечание: * g_u – м³; ρ – кг/м³.
Note: * g_u – m³; ρ – kg/m³.

Обсуждение и заключение

Предложенный оперативный метод определения механического КПД для дизелей с топливной аппаратурой непосредственного действия успешно может применяться и для диагностики дизелей с аккумуляторными электронно управляемыми системами топливоподачи с тем отличием, что в данном случае не требуется использования

камер с противодавлением, а функция устройства пропуска впрысков возлагается на разработанный блок, пропускающий впрыски разрывом сигнальной линии от ЭБУ к форсунке. Практикуемая при этих системах корректировка (увеличение) цикловой подачи по мере износа дизеля незначительно снижает механический КПД и может не учитываться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габитов И. И., Неговора А. В. Совершенствование средств технического сервиса автотракторной и мобильной сельскохозяйственной техники // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 117. С. 62–66. EDN: [TFDLLP](#)
2. Сафин Ф. Р. Совершенствование технической эксплуатации тракторных дизелей. Уфа : Башкирская энциклопедия, 2021. 184 с. EDN: [WDLBWB](#)
3. Арженовский А. Г., Чичилов И. И. Совершенствование методики и средств диагностирования дизельных двигателей. Зерноград : Азово-Черноморский инженерный ин-т ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. 175 с. URI: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009610300> (дата обращения: 14.02.2023).
4. Власов В. М., Жанказиев С. В., Круглов С. М. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей. М. : Изд. центр «Академия», 2013. 432 с. URI: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008889845> (дата обращения: 14.02.2023).
5. Justification for Widening the Control Parameters Limits of Diesel Fuel Injectors during Repair / I. Gabitov [et al.] // International Review of Automatic Control. 2022. Vol. 15, issue. 2. P. 70–89. <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21630>
6. Method and Technology for Continuous Control of Performance and Operating Quality of Automotive and Combine Machinery / I. Gabitov [et al.] // International Review of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 14, issue 3. P. 160–168. <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i3.18731>
7. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems / M. Jovanović [et al.] // Military Technical Courier. 2017. Vol. 65, issue 4. P. 968–993. <https://doi.org/10.5937/vojtehg65-11577>
8. Способ диагностирования и регулирования дизельной топливной аппаратуры на двигателе : патент 2668589 Российская Федерация / Баширов Р. М. [и др.]. № 2018103579 ; заявл. 30.01.2018 ; опубл. 02.10.2018. Бюл. № 28. 9 с. EDN: [WSXLVG](#)
9. Баширов Р. М., Сафин Ф. Р. Сравнительный анализ методик определения механического КПД автотракторных дизелей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (50). С. 95–103. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2019-50-2-95-103>
10. Ложкин М. Н. Расчет тепловых, газодинамических и механических параметров автотракторных двигателей : учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. 31 с. URI: <https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/351/1/Ложкин%201-22-11.pdf> (дата обращения: 14.02.2023).
11. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System / L. Grekhov [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, issue 5. P. 3979–3986. URL: <https://www.researchgate.net/publication/304306489> (дата обращения: 14.02.2023).
12. Graham M., Crossley S., Harcombe T. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles // SAE Technical Papers. 2014. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1435>
13. Hardware and Software Complex and a Device for Setting Optimal Parameters of the Unit Injector Operation in Diesel Engines / I. Gabitov [et al.] // Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems. 2020. Vol. 13, issue. 2. P. 111–124. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2020.109784>
14. Zhao J., Yue P., Grekhov L. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector // International

Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2019. Vol. 60, no. 2. P. 173–185. <https://doi.org/10.3233/JAE-180022>

15. Belchev S. Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 614. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003>

16. Диагностирование и регулирование топливной аппаратуры дизелей в полевых условиях методикой Башкирского ГАУ / С. З. Инсафудинов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 4. С. 165–171. EDN: [QMUXKZ](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2019.4.165-171)

17. Баширов Р. М., Сафин Ф. Р. Особенности определения механического КПД тракторных и комбайновых дизелей по методике Башкирского ГАУ // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 3 (77). С. 172–176. EDN: [VUQEYO](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2019.3.172-176)

18. Denso. Electronical Technical Service Information [Электронный ресурс]. URL: <http://www.denso-am.eu> (дата обращения: 14.02.2023).

19. Diagnostics and Regulation of Fuel Equipment of Diesels on Stands with Injection to Medium with Counter-Pressure / I. Gabitov [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, issue S11. P. 8782–8788. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2018.8782.8788>

20. Баширов Р. М., Сафин Ф. Р., Инсафудинов С. З. Совершенствование методики регулирования топливной аппаратуры тракторных дизелей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (31). С. 60–64. EDN: [SXXWJT](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2014.3.60-64)

21. Инсафудинов С. З., Сафин Ф. Р. О влиянии противодавления при регулировке форсунок автотракторных дизелей // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Агрокомплекс-2014»: «Перспективы инновационного развития АПК» ч. II. Уфа : Башкирский ГАУ, 2014. С. 63–68. EDN: [SFJWXR](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2014.2.63-68)

22. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel und Ottomotoren / R. Henzinger [et al.] // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. 2006. Vol. 67. P. 524–529. <https://doi.org/10.1007/BF03225407>

23. Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software // Technical Paper. 2015. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>

24. Оценка механического КПД дизельных двигателей с электронным управлением: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021619336 Российская Федерация / Сафин Ф. Р. [и др.]. № 2021618449 ; заявл. 31.05.2021 ; опубл. 08.06.2021. EDN: [CEZWBU](https://doi.org/10.26907/2542-0419.2021.2.2021618449)

Поступила 16.02.2023; одобрена после рецензирования 17.03.2023; принята к публикации 27.03.2023

Об авторах:

Сафин Филюс Раисович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>, fils02@mail.ru

Баширов Радик Минниханович, член-корреспондент Академии наук Республики Башкортостан, доктор технических наук, профессор Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), basharov@mail.ru

Неговора Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических и транспортных средств Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negira@ Rambler.ru

Корабельников Сергей Кимович, доктор технических наук, доцент Академии транспортных технологий (192102, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Салова, д. 63), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-1357>, negira@ Rambler.ru

Раков Николай Виктрович, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Ф. Р. Сафин – анализ литературных данных; описание экспериментальных и расчетных исследований; обработка полученных результатов; апробация разработанной методики.

Р. М. Баширов – научное руководство; анализ и доработка текста.

А. В. Неговора – формирование структуры статьи; доработка начального текста; составление выводов и заключения.

С. К. Корабельников – поиск и анализ информации по теме исследования; доработка текста.

Н. В. Раков – поиск и анализ информации по теме исследования; доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gabitov I.I., Negovora A.V. [Improving the Means of Technical Service of Autotractor and Mobile Agricultural Machinery]. *Proceedings of GOSNITI*. 2014;117:62–66. (In Russ.) EDN: [TFDLLP](#)
2. Safin F.R. [Improving the Technical Operation of Tractor Diesels: A Scientific Publication]. Ufa: Bashkir Encyclopedia; 2021. (In Russ.) EDN: [WDLBWB](#)
3. Arzhenovsky A.G., Chichilanov I. [Improvement of Methods and Means of Diagnosing Diesel Engines]. Zernograd: Azov-Black Sea Engineering Institute of the Donskoy GAU; 2017. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009610300> (accessed 14.02.2023). (In Russ.)
4. Vlasov V.M., Zhankaziev S.V., Kruglov S.M. [Maintenance and Repair of Cars]. Moscow: Publishing Center Academy; 2013. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008889845> (accessed 14.02.2023). (In Russ.)
5. Gabitov I., Negovora A., Ahmetov A., Kozeev A., Safin F., Razyapov M. Justification for Widening the Control Parameters Limits of Diesel Fuel Injectors during Repair. *International Review of Automatic Control*. 2022;15(2):70–89. <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21630>
6. Gabitov I., Insafuddinov S., Badretdinov I., Pavlenko V., Safin F. Method and Technology for Continuous Control of Performance and Operating Quality of Automotive and Combine Machinery. *International Review of Mechanical Engineering*. 2020;14(3):160–168. <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i3.18731>
7. Jocanović M., Karanović V., Knežević D., Orošnjak M. Diesel Fuel Filtration Problems with Modern Common Rail Injection Systems. *Military Technical Courier*. 2017;65(4):968–993. <https://doi.org/10.5937/vojtehg65-11577>
8. Bashirov R.M., Safin F.R., Magafurov R.Zh., Yulberdin R.R., Tuktarov M.F. [Method for Diagnosing and Regulating Diesel Fuel Equipment on the Engine]. Patent 2668589 Russian Federation. 2018 October 02. (In Russ.) EDN: [WSXLVG](#)
9. Bashirov R.M., Safin F.R. Comparative Analysis of Methods to Determine the Mechanical Efficiency of Car-And-Tractor Diesel Engines. *Vestnik BSAU*. 2019;(2):95–103. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2019-50-2-95-103>
10. Lozhkin M.N. [Calculation of Thermal, Gas-Dynamic and Mechanical Parameters of Automotive Engines]. Togliatti: Publishing House of TSU; 2012. Available at: <http://hdl.handle.net/123456789/351> (accessed 14.02.2023). (In Russ.)
11. Grekhov L., Dragan Yu., Denisov A., Starkov E. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(5):3979–3986. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/304306489> (accessed 14.02.2023).

12. Graham M., Crossley S., Harcombe T. Beyond Euro VI – Development of a Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles. *SAE Technical Papers*. 2014. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1435>
13. Gabitov I., Insafuddinov S., Yunusbaev N., Farhutdinov T., Sharafiev A., Abdrazakov F., et al. Hardware and Software Complex and a Device for Setting Optimal Parameters of the Unit Injector Operation in Diesel Engines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. 2020;13(2):111–124. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2020.109784>
14. Zhao J., Yue P., Grekhov L. Temperature and Frequency Dependence of Electrical Iron Effects on Electromagnetic Characteristics of High-Speed Solenoid Valve for Common Rail Injector. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2019;60(2):173–185. <https://doi.org/10.3233/JAE-180022>
15. Belchev S. Method for Determining the Parameters of Injection of Common Rail Injectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;614. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/614/1/012003>
16. Insafuddinov S.Z., Safin F.R., Yulberdin R.R., Yakupova A.A. Diagnostics and Regulation of Fuel Equipment of Diesel Engines in Field Conditions by the Technique of the Bashkir State Agricultural University. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2019;(4):165–171. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QMUXKZ
17. Bashirov R.M., Safin F.R. Features of Determining the Mechanical Efficiency of Tractor and Combine Diesel Engines According to the Method of the Bashkir State Agrarian University. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2019;3(77):172–176. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VUQEY
18. Denso. Electronical Technical Service Information. Available at: <http://www.denso-am.eu> (accessed 14.02.2023).
19. Gabitov I., Insafuddinov S., Kharisov D., et al. Diagnostics and Regulation of Fuel Equipment of Diesels on Stands with Injection to Medium with Counter-Pressure. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(S11):8782–8788. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2018.8782.8788>
20. Bashirov R.M., Safin F.R., Insafuddinov S.Z. Improving the Method of Regulating the Fuel Equipment of Tractor Diesel Engines. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2014;3(31):60–64. (In Russ.) EDN: SXXWJT
21. Insafuddinov S.Z., Safin F.R. [On the Influence of Backpressure when Adjusting the Injectors of Autotractor Diesel Engines]. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Agrococomplex-2014: Prospects for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex. Part 2. Ufa: Bashkir State Agrarian University; 2014. p. 63–68. (In Russ.) EDN: SFJWXR
22. Henzinger R., Kammerstetter H., Radke F., Werner M. Neue Messtechnik für Direkteinspritzsysteme von Diesel und Ottomotoren. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*. 2006;67:524–529. (In Germ.) <https://doi.org/10.1007/BF03225407>
23. Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A. Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-Stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel System Simulation Software. *Technical Paper*. 2015. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1859>
24. Safin F.R., Valiev A.R., Negovora A.V., Insafuddinov S.Z., Gaysin E.M., Siraev Sh.F. [Evaluation of the Mechanical Efficiency of Diesel Engines with Electronic Control]. Certificate of State Registration of the Computer Program 2021619336 Russian Federation. No. 2021618449; app. 05/31/2021; publ. 06/08/2021. (In Russ.) EDN: CEZWBW

Submitted 16.02.2023; revised 17.03.2023; accepted 27.03.2023

About the authors:

Filyus R. Safin, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Power Supply and Automation of Technological Processes, Bashkir State Agrarian University (34 50-letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-3278>, fils02@mail.ru

Radik M. Bashirov, Corresponding Member Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Bashkir State Agrarian University (34 50-Letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), basharov@mail.ru

Andrey V. Negovora, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mobile Energy and Vehicles, Bashkir State Agrarian University (34 50-Letiya Oktyabrya St., Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5133-7602>, negira@rambler.ru

Sergey K. Korabelnikov, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Academy of Transport Technologies (63 Salova St., Saint Petersburg 192102, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-1357>, negira@rambler.ru

Nikolay V. Rakov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, nikolaymgu@yandex.ru

Authors contribution:

F. R. Safin – analysis of literature data; description of experimental and computational studies; processing the data; approbation of the developed methodology.

R. M. Bashirov – scientific guidance; analysis and revision of the text.

A. V. Negovora – forming the structure of the article; finalizing the initial text; drawing conclusions.

S. K. Korabelnikov – search and analysis of information on the topic of research; completion of the text.

N. V. Rakov – search and analysis of information on the topic of research; revision of the text.

All authors have read and approved the final manuscript.



Определение границ изменения внешних параметров, усложняющих расчет подвески сельскохозяйственной техники

Н. А. Пеньков¹✉, С. Ю. Жачкин², А. И. Завражнов³

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора

Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

(г. Воронеж, Российская Федерация)

² Воронежский государственный технический университет

(г. Воронеж, Российская Федерация)

³ Мичуринский государственный аграрный университет

(г. Мичуринск, Российская Федерация)

✉ myth_nr_nikit@mail.ru

Аннотация

Введение. В статье рассматривается проблема расчета прочности вала привода колес сельскохозяйственной техники. Учитываются условия прочности как наибольшего крутящего момента, так и величины относительных деформаций вала.

Цель статьи. Определение границ внешних воздействий на элемент конструкции, обусловленных распределенным весом автотракторной техники, при которых необходимо построение не только эпюр моментов и деформаций, но и определение экстремальных значений на каждом участке, где изменение показателя прочности конструкции нелинейно.

Материалы и методы. При расчетах использованы основные положения механики сплошных сред, теории машин и механизмов, а также основы проектирования в машиностроении. Центральное внимание уделено влиянию внешних факторов воздействия на характер распределения внутренних усилий в вале.

Результаты исследования. Полученная область изменения параметров $P-q$ позволяет определять необходимость более детального расчета прочностных показателей рассматриваемой детали. Это связано с появлением экстремальных областей вне границ отдельных участков рассмотрения работы вала. Результаты представлены в виде двумерного графика соотношения внешних воздействий, при которых указанный эффект имеет место.

Обсуждение и заключение. В сравнении с типовыми расчетами, регламентированными нормативными документами, предлагаемый алгоритм на предварительном этапе позволяет определить случаи, когда нелинейные области изменения изгибающего момента требуют дополнительных исследований. Использование представляемого алгоритма позволяет, не прибегая к трудоемким численным методам расчета прочностных показателей вала привода колес, как, например, методу конечных элементов, получать более детальную картину о характере распределения внутренних усилий и деформаций в изучаемой детали.



Ключевые слова: главные компоненты тензора напряжений, деформации, эпюры, внешние параметры воздействия, прочность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пеньков Н. А., Жачкин С. Ю., Завражных А. И. Определение границ изменения внешних параметров, усложняющих расчет подвески сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 207–218. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.207-218>

Original article

Determination of the Boundaries of Changes in External Parameters that Complicate the Calculation of the Suspension of Agricultural Machinery

N. A. Penkov^a✉, S. Yu. Zhachkin^b, A. I. Zavrazhnov^c

^a Military Research and Training Center of the Air Force Military Air Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh, Russian Federation)

^b Voronezh State Technical University (Voronezh, Russian Federation)

^c Michurin State Agrarian University (Michurinsk, Russian Federation)

✉ myth_np_nikit@mail.ru

Abstract

Introduction. The article deals with the problem of calculating the strength of the shaft of the wheel drive of agricultural machinery. The strength conditions of both the maximum torque and the values of relative deformations of the shaft are taken into account.

Aim of the Article. Of the research is to determine the limits of external influences on a structural element, caused by the distributed weight of the motor-tractor machinery, at which it is necessary to construct not only the torque and strain diagrams, but also to determine the extreme values at each section, where the strength index of the structure is nonlinear.

Materials and Methods. In calculations, the main provisions of continuum mechanics, theory of machines and mechanisms, as well as the basics of design in mechanical engineering are used. Central attention is paid to the influence of external influencing factors on the character of internal force distribution in the shaft.

Results. The obtained area of variation of parameters P - q allows us to determine the necessity of more detailed calculation of strength parameters of the considered part. This is due to the emergence of extreme areas outside the boundaries of individual areas of consideration of the shaft work. The results are presented as a two-dimensional graph of the ratio of external influences, at which the specified effect takes place.

Discussion and Conclusion. In comparison with typical calculations, regulated by normative documents, the proposed algorithm at the preliminary stage allows to determine the cases when nonlinear regions of bending moment changes require additional investigations. The use of the proposed algorithm allows, without resorting to time-consuming numerical methods of calculating the strength indicators of a wheel drive shaft, such as the finite element method, to obtain a more detailed picture of the nature of distribution of internal forces and deformations in the part under study.

Keywords: main components of the stress tensor, deformations, diagrams, external influence parameters, strength



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

For citation: Penkov N.A., Zhachkin S. Yu., Zavrzhnov A.I. Determination of the Boundaries of Changes in External Parameters that Complicate the Calculation of the Suspension of Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):207–218. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.207-218>

Введение

Современное развитие технических машин в различных сферах человеческой деятельности требует постоянного повышения требований к их характеристикам. Это приводит к появлению новых научно-технических проблем, решение которых обеспечивает рост производственных возможностей общества¹. Одним из примеров повышения эффективности использования автотракторной техники в сельскохозяйственной отрасли служит вопрос повышения надежности ее элементов подвески² [1; 2].

Проблематика надежности во многом характеризуется ее взаимосвязью со всеми этапами жизненного цикла рассчитываемого узла, начиная от проектирования и изготовления и заканчивая использованием и последующим списанием вышедшего из строя изделия³ [3]. Все этапы жизненного цикла вносят свой вклад в решение комплексной задачи создания машины требуемого уровня надежности при минимизации затрат времени и финансов. Решения, принятые на этапе проектирования, в значительной мере определяют эксплуатационные и экономические показатели рассчитываемого изделия. Указанные параметры не

являются независимыми. Определение существующей взаимосвязи между ними во многом помогает решать оптимизационную задачу получения максимальных эксплуатационных показателей при заданных исходных параметрах рассчитываемого узла [4–7].

В этой связи в статье представлен пример алгоритма одного из показателей, определяющих надежность и качество проектируемого изделия – координат опасного сечения рабочего узла. Рассматривается проблема расчета прочности вала привода колес сельскохозяйственной техники на основании допущений механики сплошных сред. Учитываются условия прочности как наибольшего крутящего момента, так и величины относительных деформаций вала⁴ [1; 8]. Задачей исследования является разработка способа определения области фазового пространства изменения внешних воздействий на элемент конструкции, обусловленных распределенным весом автотракторной техники, при которых необходимо построение не только эпюр моментов и деформаций, но и определение экстремальных значений на каждом участке, где изменение показателя прочности конструкции нелинейно.

¹ Timoshenko S. P. *Strength of Materials. P. 1. Elementary Theory and Problems*. New York: D. Van Nostrandcompany, 1930. P. 365; Тимошенко С. П. *История науки о сопротивлении материалов*. М.: Наука, 1957. С. 560; Седов Л. И. *Механика сплошной среды Т. 1*. М.: Наука, 1976. С. 536; Timoshenko S. P. *Strength of Materials. P. 2. Advanced Theory and Problems*. New York: D. Van Nostrandcompany, 1941. P. 480.

² Проников А. С. *Надежность машин*. М.: Машиностроение, 1978. С. 592.

³ Тимошенко С. П. *История науки о сопротивлении материалов*; Проников А. С. *Надежность машин*; Буренин А. А., Ковтанюк Л. В. *Упругие эффекты при интенсивном необратимом деформировании*. Владивосток: Из-во ДВГТУ, 2011. С. 280.

⁴ Седов Л. И. *Механика сплошной среды Т. 1*; Marguerre K. *Luftfahrtforsch: Nat. advisory comm. aeronaut. No. 1005*. 1942. P. 253–261; Karman Th. *Über die Grundlagen der Balkentheorie [Beyond the Basics of the beam theory]*. *Abhandlungen aus dem Aerodynamischen Institut an der Technischen Hochschule, Aachen*. 1927. Vol. 7.

В наиболее общем виде расчеты нагруженного вала на прочность необходимо вести по нескольким показателям: предельная нагрузка от действия изгибающего момента, предельная нагрузка от поперечной силы и величина допустимой деформации оси вала⁵ [9–11]. Общее заключение о несущей способности детали можно сделать на основе анализа всех вышеперечисленных факторов.

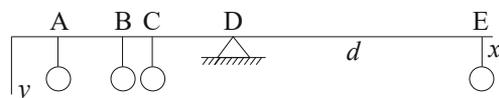
В настоящий момент в подавляющем большинстве случаев комплексные расчеты деталей машин на надежность и долговечность не производятся. Кроме того, нет единой схемы производства таких расчетов⁶ [6; 12; 13]. Инженеры ограничиваются отдельными показателями, не способными характеризовать работу изучаемого узла в целом в течение всего жизненного цикла.

Обзор литературы

Исследование поведения поперечно нагруженных симметричных балок, является начальным этапом изучения работы упругих твердых тел в рамках сопротивления материалов в технических вузах. Предваряют это изучение лишь симметричные растяжения и сжатия тел правильной формы⁷ [14; 15].

Первые систематические исследования работы балок на изгиб были проведены французским ученым Мариоттом⁸ [11]. Помимо прочности материалов, его также интересовала упругая составляющая процесса деформирования. В своих экспериментах с поперечно нагруженными симметричными балками (схема эксперимента представлена на рисунке 1) он показывает, что разрушение наступает тогда, когда удлинение

конструкции превышает некоторое предельное значение (варьируемый параметр – d)⁹ [16].



Р и с. 1. Опыты Мариотта на изгиб
F i g. 1. Marriott's bending experiments

Далее Мариотт замечает, что волокна в нижней части поперечного сечения испытывают сжимающие усилия, в то время как волокна верхней части – растянуты. Прочность растянутых волокон в этом случае будет равна половине значения прочности всей конструкции, аналогичные рассуждения он проводит и для сжатых волокон. Однако получить правильное соотношение для прочности всей конструкции ему помешал некорректный расчет площади поперечного сечения.

Для определения уравнения изогнутой оси балки Я. Бернулли впервые использует аппарат математического анализа. Он вводит понятие кривизны кривой изгиба и определяет ее взаимосвязь с величиной изгибающего момента¹⁰ [17; 18]. Более детально этот вопрос разработал в дальнейшем Эйлер, решая задачу о цепной линии с использованием аппарата вариационного исчисления [14; 19].

Предел прочности балки в своих трудах впервые описал Кулон, анализируя уравнения статики для горизонтальных и вертикальных составляющих внутренних усилий в рассматриваемом сечении. Он аналитически установил, что центром

⁵ Timoshenko S. P. Strength of Materials. P. 1; Буренин А. А., Ковтанюк Л. В. Упругие эффекты при интенсивном необратимом деформировании.

⁶ Молчанов В. Ф. Повышение долговечности и надежности работы деталей машин, механизмов и приборов хромированием в саморегулирующемся электролите с добавкой бихромата калия. Киев : КВИАУ, 1968. 219 с.

⁷ Timoshenko S. P. Strength of Materials. P. 2.

⁸ Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов; Marguerre K. Luftfahrtforsch. ...

⁹ Timoshenko S. P. Strength of Materials. P. 2.

¹⁰ Там же.

поворота изгибающийся балки является не нижняя ее кромка, а ось симметрии¹¹.

В 1826 г. Навье впервые описывает не определение предельных нагрузок конструкций, как делали до него, а расчет предельного значения внешних воздействий на тело, при котором оно ведет себя еще упруго¹² [8]. Полагая прогибы, возникающие в балке, малыми, он определяет зависимость:

$$EJ_z \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = M, \quad (1)$$

где J_z – момент инерции сечения балки; M – величина изгибающего момента в рассматриваемом сечении относительно нейтральной оси, а система координат вводится так, как представлено на рисунке 1. Ею он пользуется для любого случая поперечного нагружения простой балки.

Сен-Венан, используя аппарат математической теории упругости, показал, что при расчетах балок методами сопротивления материалов можно пользоваться рядом существенных допущений [11]:

- поперечные сечения балок остаются плоскими при деформировании;
- продольные волокна балки не оказывают какого-либо воздействия друг на друга, испытывая лишь растяжение/сжатие.

Однако, несмотря на значимость вышеперечисленных исследований, не все результаты, полученные в них, нашли отражение в существующих методах расчета элементов конструкций на прочность используемых инженерно-техническим составом.

В настоящий момент расчеты на прочность проводятся с использованием ГОСТ 27609-88 «Расчеты и испытания

на прочность в машиностроении» по направлениям применения рассматриваемых деталей и механизмов. Если точности моделей, предусмотренных допущениями сопротивления материалов, достаточно для расчетов элементов конструкций, то нормативных документов, определяющих алгоритм такого расчета, оказывается недостаточно. Здесь возможны исключения, когда определение критических значений внутренних усилий таким способом существенно неверно. Залогом правильного определения прочностных показателей рассчитываемой детали является корректное определение опасного сечения в рассматриваемом случае. Этой цели посвящена настоящая статья.

Материалы и методы

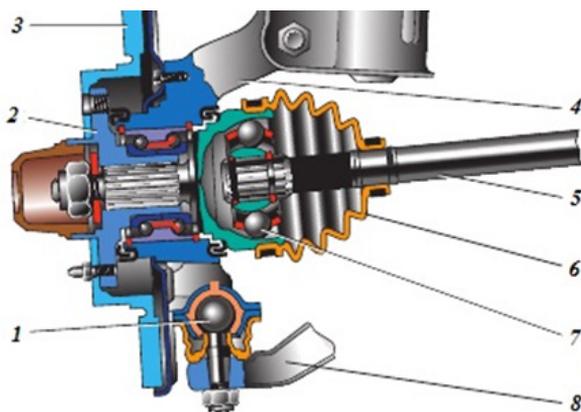
В современной инженерной практике есть определенные трудности в использовании конечных соотношений по расчету различных элементов конструкций с использованием аппарата механики сплошных сред¹³ [4]. В этой связи целесообразным видится разработка рекомендаций при производстве инженерных расчетов, позволяющая, в случае необходимости, проводить корректировку определения опасных сечений либо величин внутренних усилий, возникающих от действия внешних факторов на рассматриваемую деталь.

Схема расположения вала привода колеса в системе подвески автотракторной техники представлена на рисунке 2. Сила P характеризует контакт полуоси со ступицей колеса, распределенная нагрузка q – нагрузку от частей дифференциала. Представленная модель во многих случаях адекватно описывает напряженно-деформированное состояние работы вала.

¹¹ Timoshenko S. P. Strength of Materials. P. 2.

¹² Там же; Спицин И. А., Голубев И. Г. Новые технологические процессы восстановления деталей машин гальваническими покрытиями. М. : ФГНУ «Росинформатротех», 2001.

¹³ Молчанов В. Ф. Повышение долговечности и надежности работы деталей машин...



Р и с. 2. Механизм крепления вала привода колеса:
 1 – шаровая опора; 2 – ступица; 3 – тормозной диск; 4 – поворотный кулак;
 5 – вал привода переднего колеса; 6 – защитный чехол; 7 – наружный шарнир вала;
 8 – нижний рычаг

Fig. 2. Wheel drive shaft mounting mechanism:
 1 – spherical bearing; 2 – hub; 3 – brake disk; 4 – rounded fist; 5 – front wheel drive shaft;
 6 – protective case; 7 – external shaft joint; 8 – lower arm

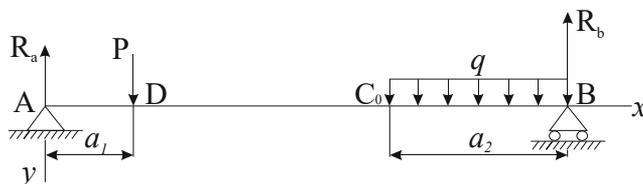
В качестве модели работы вала принимается статически определимая симметричная поперечно нагруженная стальная балка, представленная на рисунке 3.

При определении напряжений и деформаций в рассматриваемой детали приняты допущения механики сплошных сред. Вводится пространственная декартова прямоугольная система координат. Начало координат находится в точке A (рис. 3), ось Ax совпадает с направлением вектора \overline{AB} , ось Ay направлена вдоль линий действия сил (направление совпадает с направлением вектора \overline{P}), ось Az – перпендикулярно плоскости рисунка, причем направление выбрано так, что указанные оси образуют правую тройку векторов.

В качестве материала изготовления детали используется конструкционная сталь, для которой определены основные показатели, характеризующие ее механические свойства: плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона.

Сечение вала плоскостью Axz – круг, радиуса d . Для него момент инерции относительно оси Az : $J_z = \frac{\pi d^4}{64}$.

Длина вала принимается: a . Расстояния AD и CB (рис. 3) полагаем: a_1 и a_2 . Усилие, передаваемое от веса заданной единицы техники на левую оконечность вала, примем P (площадь контакта много меньше длины вала), распределенная нагрузка в месте крепления вала



Р и с. 3. Модель работы вала привода колеса
 Fig. 3. Model of the wheel driveshaft

с дифференциалом: q (значительная площадь контакта обуславливается жесткими режимами эксплуатации сельскохозяйственной техники).

Расчеты на прочность проводятся исходя из условия максимального изгибающего момента, возникающего в поперечном сечении детали¹⁴ [20; 21].

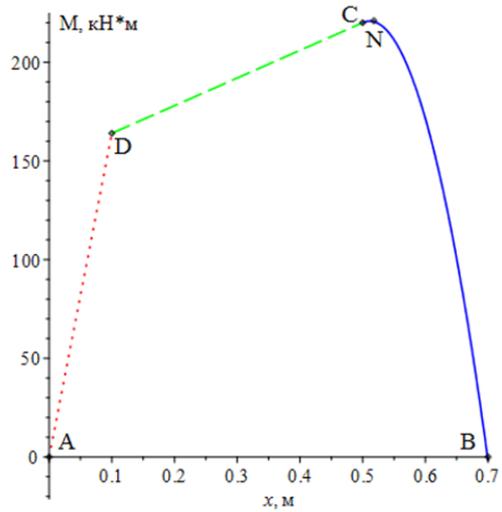
Результаты исследования

Методами статики определяем значения сил реакции, возникающих в вале на примере сеялки Väderstad RAPIDRD 300 при $P = 1,5$ кН, $q = 12,5$ кН/м, $a = 0,7$ м, $a_1 = 0,1$ м, $a_2 = 0,2$ м, $d = 0,04$ м, $R_a = 1,64$ кН, $R_b = 2,36$ кН. На основе полученных данных строим эпюру изгибающего момента для всей балки (рис. 4).

Максимальное значение изгибающего момента при данном виде нагружения реализуется в сечении, проходящем через точку N (рис. 4) нормально к оси симметрии вала (расчеты проводились с использованием пакета математических программ Maple). Расстояние $AN = 0,51$ м.

Для определения прогибов вала вдоль всей длины воспользуемся соотношением (1). Для уравнений ординат прогибов будем иметь:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = \frac{1}{EJ_z} \left(-\frac{R_a}{6} x^3 + C_1 x + C_2 \right), x \in [0, a_1] \\ y = \frac{1}{EJ_z} \left(\frac{P - R_a}{6} x^3 - \frac{Pa_1}{2} x^2 + C_3 x + C_4 \right), x \in [a_1, a - a_2] \\ y = \frac{1}{EJ_z} \left(\frac{q}{24} x^4 + \frac{P - R_a - q(a - a_2)}{6} x^3 + \frac{q(a - a_2)^2 - 2Pa_1}{4} x^2 + C_5 x + C_6 \right), x \in [a - a_2, a] \end{array} \right. \quad (2)$$



Р и с. 4. Эпюра изгибающего момента поперечно нагруженного вала

F i g. 4. Diagram of the bending moment which perceives a transversely loaded shaft

Неизвестные постоянные интегрирования определяются из начальных и граничных условий: прогибы в точках A и B равны нулю, прогибы слева и справа соответственно от точек C и D совпадают (нет разрывов вала), касательные в указанных точках также совпадают с обеих сторон (нет изломов вала). В итоге получаем следующую систему линейных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 - C_3 - 10C_4 = -5 \\ C_1 - C_3 = -6,1 \\ C_3 + 2C_4 - C_5 - 2C_6 = 195,3 \\ C_3 - C_5 = 260,42 \\ C_6 = -0,7C_5 - 110 \\ C_2 = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Определитель указанной системы отличен от нуля, следовательно, существует единственное решение, представимое

¹⁴ Молчанов В. Ф. Повышение долговечности и надежности работы деталей машин...

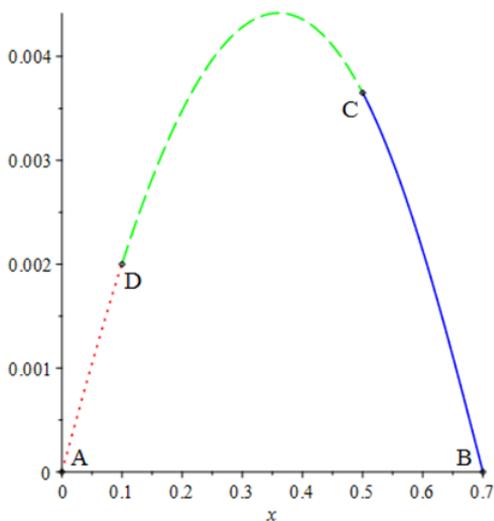
следующей точкой в шестимерном пространстве констант: $\{55,6; 0; 63,1; -0,25; -197,32; 32,3\}$.

Таким образом, для уравнения изогнутой оси вала¹⁵ окончательно будем иметь:

$$\begin{cases} y = -0,1x^3 + 0,02x, x \in [0, a_1) \\ y = -8,84 \cdot 10^{-3}x^3 - 0,03x^2 + \\ + 0,02x - 9,48 \cdot 10^{-5}, x \in [a_1, a - a_2). \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} y = 0,2x^4 - 0,4x^3 + 0,27x^2 - \\ - 0,07x + 0,01, x \in [a - a_2, a] \end{cases}$$

Графически выражение (4) представлено на рисунке 5. Максимальный прогиб реализуется на участке DC.



Р и с. 5. Уравнение изогнутой оси вала
F i g. 5. Curved shaft axis equation

Зададимся теперь целью определения всех таких вариантов нагружения вала, при которых опасное сечение расположено не на границе двух зон с заданным законом распределения момента, проходящим через точку C, а на участке CD.

Такое положение дел приводит нас к необходимости более детального исследования уравнения изменения момента на исследуемом участке. Указанный случай обычно не учитывается в инженерных расчетах валов на прочность. Реализация такого сценария происходит, когда абсцисса вершины параболы CNB (рис. 4) расположена правее точки C. В общем случае она определяется следующим соотношением:

$$x_{\max} = \frac{1}{2}a + \frac{(a - a_2)^2}{2a} - \frac{a_1}{a} \cdot \frac{P}{q}, \quad (5)$$

и является функцией пяти параметров. Условно их можно разделить на две группы. К первой относятся параметры, определяющие координаты точек приложения внешних нагрузок на вал: a, a_1, a_2 ; ко второй – интенсивность приложенных усилий: P, q .

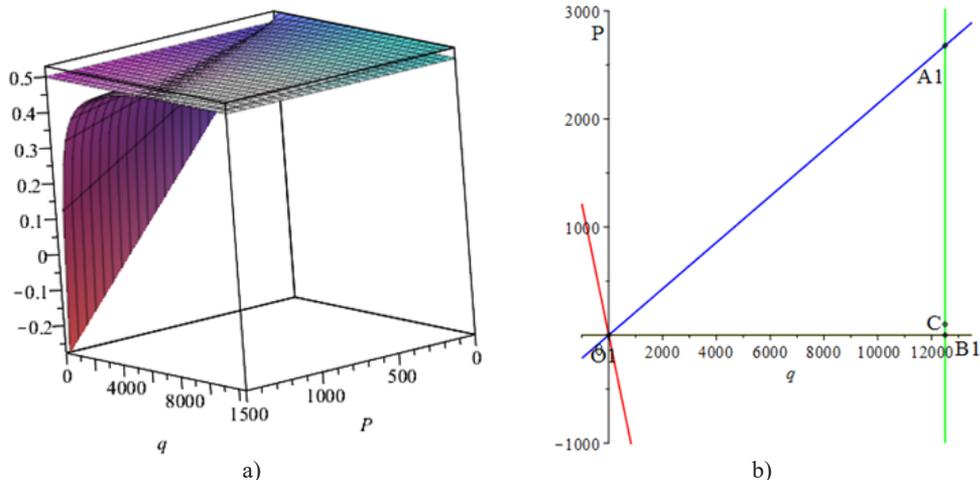
Принимая характер распределения внешних воздействий на вал неизменным (считаем, что расчет производится по заданному проекту компоновки подвески автотракторной техники – на примере сеялки Väderstad RAPIDRD 300), координаты опасного сечения будут определяться интенсивностью внешних воздействий на вал:

$$x_{\max} = 0,53 - 0,14 \frac{P}{q}. \quad (6)$$

Для определения зоны изменения параметров P - q исходим из следующих предположений. Диапазон изменения величины x_{\max} задан интервалом $(a - a_2, a]$. Значения внешних воздействий положительны. Накладывая указанные условия на зависимость (5) получим графическое представление искомой области (рис. 6).

Численное решение указанной системы неравенств методом перебора с использованием пакета математических программ Maple позволило определить

¹⁵ Timoshenko S. P. Strength of materials. P. 1.



Р и с. 6. Критическая область изменения внешних воздействий, приводящая к необходимости проведения дополнительных расчетов:
 а – абсцисса опасного сечения как функция внешних воздействий;
 б – область кривой (б), находящаяся выше плоскости $x = 0,5$ м

Fig. 6. Critical area of change the external influences, leading to the need for additional calculation:
 а – abscissa of the dangerous section as a function of external influences;
 б – area of the curve (b) above the plane $x = 0.5$ m

значение параметров P - q , при котором отклонение точки экстремума на эпюре изгибающих моментов от точки C (рис. 4) будет иметь место. Это позволит определить наиболее невыгодное положение существующей системы расчета вала на прочность, дав максимальное различие с результатами, полученными с использованием предложенной методики. Найденная область изменения параметров внешнего воздействия $O_1A_1B_1$ изображена на рисунке 6 б. Красная прямая определяет здесь полуплоскость, задаваемую неравенством $x_{\max} > 0,5$, синяя – полуплоскость $x_{\max} < 0,7$. Точкой C обозначено напряженное состояние, рассматриваемое на рисунках 3–5. Она принадлежит треугольнику $O_1A_1B_1$, что и позволяет говорить в рассматриваемом случае о необходимости проведения скорректированного расчета.

Обсуждение и заключение

В результате авторами получена область $O_1A_1B_1$, представленная на рисунке 6, которая определяет границы

изменения усилий, воспринимаемых валом от внешних воздействий, при которых координаты расположения опасного сечения не являются очевидными и не всегда корректно определяются при производстве инженерных расчетов деталей подвески сельскохозяйственной техники на прочность согласно ГОСТ 27609-88. В этом случае исследование необходимо продолжить, определив координаты поперечного сечения, в котором реализуется экстремум величины изгибающего момента на интервале $(a-a_2, a]$ изменения координаты вдоль оси симметрии вала, а затем определить его значение. Разработанная в среде Maple программа позволяет для данного типа нагрузки определить область изменения внешних параметров, а в случае выхода значений нагрузки за указанные границы – провести скорректированный расчет опасного сечения в полуоси, дающего возможность более точно произвести расчет всей детали на прочность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Impact of the Strengthening Phase Filler on the Properties of Composite Dispersion-Strengthened Galvanic Coatings / S. Yu. Zhachkin [et al.] // *Engineering Computations*. 2018. Vol. 35, no. 8 (2). P. 3245–3251.
2. Управление внутренними напряжениями в гальванических композитных покрытиях на основе железа / С. Ю. Жачкин [и др.] // *Труды ГОСНИТИ*. 2017. Т. 129. С. 183–188.
3. Астахов М. В. Износостойкость композиционных хромовых покрытий, полученных методом гальваноcontactного осаждения // *Известия вузов. Машиностроение* : сб. науч. тр. М., 2004.
4. Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И. Оценка физико-механических параметров покрытий плазменного напыления после восстановления детали трения авиационной промышленности // *ВКС. Теория и практика*. 2019. № 11. С. 77–84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-fiziko-mehnicheskikh-parametrov-pokrytiy-plazmennogo-napyleniya-posle-vosstanovleniya-detali-treniya-aviatsionnoy/viewer> (дата обращения: 11.02.2023).
5. Zhachkin S. Yu., Penkov N. A., Krasnova M. A. The Technical Definition of Permanent Dispersion-Strengthened Composite Multilayer Galvanic Coatings // *Australian Journal of Education and Science*. 2018. Vol. XI, no. 1 (21). Pp. 238–253.
6. Zhachkin S. Yu., Penkov N. A., Krasnova M. A. Analytical Calculation of Elastic Modulus of Composite Electroplating Coatings // *MATPR 10241*. 2019. P. 2515–2517. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.172>
7. Буренин А. А., Ковтанюк Л. В., Полоник М. В. Формирование одномерного поля остаточных напряжений в окрестности цилиндрического дефекта сплошности упругопластической среды // *Прикладная математика и механика*. 2003. Т. 67, № 2. С. 316–325. EDN: OOMUOZ
8. Определение напряжений в гальваническом композитном покрытии с учетом теории дислокаций / С. Ю. Жачкин [и др.] // *ВКС. Теория и практика*. 2020. № 13. С. 221–228. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-napryazheniy-v-galvanicheskom-kompozitnom-pokrytii-s-uchetom-teorii-dislokatsiy/viewer> (дата обращения: 11.02.2023).
9. Warier R. R., Sinha A., Sukumar S. Line-of-Sight Based Spacecraft Attitude and Position Tracking Control // *European Journal of Control*. 2016. Vol. 32. Pp. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2016.04.001>
10. Ивлев Д. Д. О теории трещин квазихрупкого разрушения // *Прикладная механика и техническая физика*. 1967. № 6. С. 88–120. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=158788&ARTICLE_ID=158977 (дата обращения: 11.02.2023).
11. Aleksandrov A. Yu., Aleksandrova E. B., Tikhonov A. A. Monoaxial Attitude Stabilization of a Rigid Body Under Vanishing Restoring Torque // *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*. 2018. Vol. 18, no. 1. P. 12–21. <https://doi.org/10.1007/s11071-018-4191-4>
12. Zhachkin S. Yu., Penkov N. A., Krasnova M. N. Dispersion-Hardened Composite Coatings with Desired Physical and Mechanical Properties // *Engineering Computations*. 2017. Vol. 34, no. 8 (2). P. 2577–2586.
13. Zhachkin S. Yu., Penkov N. A., Krasnova M. N. To the Question of the Influence on Pressure of the Tool on the Processed Surface when Applying the Dispensable-Strengthened Composite Galvanic Coatings // *MATPR 10241*. 2019. P. 2512–2514.
14. Molodenkov A. V., Sapunkov Ya. G. Analytical Quasi-optimal Solution for the Problem on Turn Maneuver of an Arbitrary Solid with Arbitrary Boundary Conditions // *Mechanics of Solids*. 2019. Vol. 3. P. 474–485. <https://doi.org/10.3103/S0025654419020110>
15. Levskii M. V. Optimal Control of Kinetic Moment During the Spatial Rotation of a Rigid Body // *Mechanics of Solids*. 2019. Vol. 1. P. 92–111.
16. About Determining the Microhardness of Composite Coatings / S. Yu. Zhachkin [et al.] // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1037. P. 486–493.
17. Jahromi B. H., Varizi A. Elasto-plastic Stresses in a Functionally Graded Rotating Disk // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2012. Vol. 134, no. 2. 021002. <https://doi.org/10.1115/1.4006023>
18. Chernoiwanov V. I. Organization and Technology of Restoration Machine Parts. Moscow : GOSNITI, 2003.
19. Akulenko L. D. Sirotnin A. N. Trigonometric Extremals in the Optimal Control Problem of the Reorientation of the axis of a Dynamically Symmetric Rotating Body // *JAMM*. 2011. Vol. 77, issue 3. P. 305–313.
20. Beaman J. J. Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective // *The University of Texas*. Austin, Texas. 2009. URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/76265/2001-66-Beaman.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (дата обращения: 11.02.2023).

21. Nejad M. Z., Rastgoo A., Hadi A. Exact Elasto-Plastic Analyses of Rotating Disks Made of Functionally Graded Materials // International journal of engineering science. 2014. Vol. 85. P. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2014.07.009>

Поступила 13.02.2023; одобрена после рецензирования 14.04.2023; принята к публикации 24.04.2023

Об авторах:

Пеньков Никита Алексеевич, доктор технических наук, начальник лаборатории – заместитель начальника 1 ОНИ НИЦ (ОиИТ) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>, myth_np_nikit@mail.ru

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства Воронежского государственного технического университета (394026, Российская Федерация, г. Воронеж, Московский проспект, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, zhach@list.ru

Завражнов Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, ведущий научный сотрудник Мичуринского государственного аграрного университета (393760, Российская Федерация, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101), snikishin24@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

Н. А. Пеньков – литературный и патентный анализ; обработка результатов теоретических исследований; доработка текста.

С. Ю. Жачкин – литературный и патентный анализ; формулирование основной концепции исследования; критический анализ.

А. И. Завражнов – научное руководство; формулирование основной концепции исследования; формулирование выводов; критический анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A., Zavrazhnov A.I. The Impact of the Strengthening Phase Filler on the Properties of Composite Dispersion-Strengthened Galvanic Coatings. *Engineering Computations*. 2018;35(8):3245–3251.
2. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Sidorkin O.A., Nelysov S.V. [Management of Internal Stresses in Electroplated Iron-Based Composite Coatings]. *Works of GOSNIT*. 2017;129:183–188. (In Russ.)
3. Astakhov M.V. [Wear Resistance of Composite Chromium Coatings Obtained by Galvanic Contact Deposition]. In: Proceedings of Higher Education Institutions. Engineering: Collection of scientific papers. Moscow; 2004. (In Russ.)
4. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I. Assessment of Plasma Spraying Coatings Physical and Mechanical Parameters After Restoration of the Aviation Industry Friction Parts. *VKS. Theory and Practice*. 2019;(11):77–84. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-fiziko-mehnicheskikh-parametrov-pokrytiy-plazmennogo-napyleniya-posle-vosstanovleniya-detali-treniya-aviatsionnoy/viewer> (accessed 11.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.A. The Technical Definition of Permanent Dispersion-Strengthened Composite Multilayer Galvanic Coatings. *Australian Journal of Education and Science*. 2018;11(1):238–253.
6. Penkov N.A., Zhachkin S.Yu., Krasnova M.A. Analytical Calculation of Elastic Modulus of Composite Electroplating Coatings. *MATPR*. 2019;10241:2515–2517. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.172>
7. Burenin A.A., Kovtanyuk L.V., Polonik M.V. [Formation of a One-Dimensional Residual Stress Field in the Vicinity of a Cylindrical Continuity Flaw in an Elastic-Plastic Medium]. *PMM*; 2003;67(2):316–325. (In Russ.) EDN: OOMUOZ
8. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.N., Yatsenko S.N. Tensions Determination in a Galvanic Composite Coating Taking Into Account the Dislocation Theory. *VKS. Theory and Practice*. 2020;(13):221–228.

Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-napryazheniy-v-galvanicheskom-kompozitnom-pokrytii-s-uchetom-teorii-dislokatsiy/viewer> (accessed 11.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

9. Warier R.R., Sinha A., Sukumar S. Line-of-Sight Based Spacecraft Attitude and Position Tracking Control. *European Journal of Control*. 2016;32:43–53. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2016.04.001>

10. Ivlev D.D. [On the Theory of Quasi-Brittle Fracture Cracks]. *PMTF*. 1967;(6):88–120. Available at: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=158788&ARTICLE_ID=158977 (accessed 11.02.2023). (In Russ.)

11. Aleksandrov A.Yu., Aleksandrova E.B., Tikhonov A.A. Monoaxial Attitude Stabilization of a Rigid Body under Vanishing Restoring Torque. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*. 2018;18(1):12–21. <https://doi.org/10.1007/s11071-018-4191-4>

12. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.N. Dispersion-Hardened Composite Coatings with Desired Physical and Mechanical Properties. *Engineering Computations*. 2017;34(8):2577–2586.

13. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.N. To the Question of the Influence on Pressure of the Tool on the Processed Surface When Applying the Dispensable-Strengthened Composite Galvanic Coatings. *MATPR*. 2019;10241:2512–2514.

14. Molodenkov A.V., Sapunkov Ya.G. Analytical Quasi-Optimal Solution for the Problem on Turn Maneuver of an Arbitrary Solid with Arbitrary Boundary Conditions. *Mechanics of Solids*. 2019;3:474–485. <https://doi.org/10.3103/S0025654419020110>

15. Levskii M.V. Optimal Control of Kinetic Moment during the Spatial Rotation of a Rigid Body. *Mechanics of Solids*. 2019;(1):92–111.

16. Zhachkin S.Yu., Zavrazhnov A.I., Penkov N.A., Kudryavtsev G.V., Tsisarenko P.V. About Determining the Microhardness of Composite Coatings. *Materials Science Forum*. 2021;1037:486–493.

17. Jahromi B.H., Varizi A. Elasto-Plastic Stresses in a Functionally Graded Rotating Disk. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2012;134(2):021002. <https://doi.org/10.1115/1.4006023>

18. Chernouvanov V.I. Organization and Technology of Restoration Machine Parts. 2nd ed. Moscow: GOSNITI; 2003.

19. Akulenko L.D., Sirotn A.N. Trigonometric Extremals in the Optimal Control Problem of the Reorientation of the Axis of a Dynamically Symmetric Rotating Body. *JAMM*. 2011;77(3):305–313.

20. Beaman J.J. Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective. Austin: University of Texas; 2009. Available at: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/76265/2001-66-Beaman.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (accessed 11.02.2023).

21. Nejad M.Z., Rastgoo A., Hadi A. Exact Elasto-Plastic Analyses of Rotating Disks Made of Functionally Graded Materials. *International Journal of Engineering Science*. 2014;85:47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2014.07.009>

Submitted 13.02.2023; revised 14.04.2023; accepted 24.04.2023

About the authors:

Nikita A. Penkov, Dr.Sci. (Engr.), Deputy Head of Research Department MERC AF “AFA”, Military Research and Training Center of the Air Force Military Air Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky (54A Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>, myth_np_nikit@mail.ru

Sergey Yu. Zhachkin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of the Chair of Automated Equipment of Machine-Building Production, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy Prospekt, Voronezh 394026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, zhach@list.ru

Anatoliy I. Zavrazhnov, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Michurin State Agrarian University (101 International St., Michurinsk 394064, Russian Federation), snikishin24@bk.ru

Authors contribution:

N. A. Penkov – analyzing academic literature and patents; processing of theoretical research results; finalization of the text.

S. Yu. Zhachkin – analyzing academic literature and patents; formulation of the main concept of research; critical analysis.

A. I. Zavrazhnov – scientific guidance; formulation of the main concept of research; formation of conclusions; critical analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 631.313:634.7

doi: 10.15507/2658-4123.033.202302.219-236

Оригинальная статья



Совершенствование конструкции дисковой бороны для ягодников

В. Н. Ожерельев , **В. В. Никитин**
Брянский государственный аграрный университет
(г. Брянск, Российская Федерация)
 vicoz@bk.ru

Аннотация

Введение. Снижение дальности отброса почвы в кустовую и прикустовую зоны, а также поддержание выровненной поверхности междурядий ягодных культур являются актуальными научными проблемами.

Цель статьи. Определение основных параметров процесса взаимодействия сферического диска с переувлажненной почвой и разработка на этой основе технического решения, позволяющего уменьшить дальность отброса почвенной ленты в условиях междурядий ягодных культур.

Материалы и методы. Объект исследования – садовая дисковая борона, снабженная защитным щитом, смонтированным перед крайним диском передней батареи орудия. Предмет исследования – процесс взаимодействия крайнего диска передней батареи бороны с переувлажненной почвой в ягодниках. Оптимизационными параметрами при проведении полевых экспериментов были выбраны длина щитка и его пространственная ориентация. Оценку качества обработки междурядий ягодников производили профилированием их поверхностей.

Результаты исследования. По результатам теоретических исследований установлено, что угол наклона защитного щитка в горизонтальной плоскости должен находиться в пределах 53–54°, а по направлению к движению бороны – 50–58°. Результаты полевых экспериментов подтвердили теоретические предпосылки. Установлено, что полностью исключить боковой отброс почвы за пределы ширины захвата орудия позволяет только защитный щиток, длина которого составляет 450 мм, а угол установки – 50°. Кроме того, при этих параметрах обеспечивается устойчивая работа дискового орудия практически при любой влажности и засоренности междурядий ягодных кустарников.

Обсуждение и заключение. Использование модернизированного почвообрабатывающего орудия позволило исключить отброс почвы в кустовую зону, увеличить скорость движения агрегата на 25 %.

© Ожерельев В. Н., Никитин В. В., 2023



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

Ключевые слова: междурядья ягодных культур, отброс почвы, дисковая борона, сферический диск, защитный щиток

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Для цитирования: Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Совершенствование конструкции дисковой бороны для ягодников // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 219–236. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.219-236>

Original article

Improving the Design of the Disc Harrow for Berry Plantations

V. N. Ozherelev ✉, V. V. Nikitin

Bryansk State Agrarian University (Bryansk, Russian Federation)

✉ vicoz@bk.ru

Abstract

Introduction. Reducing the distance of throwing soil into the zone around bushes and maintaining a leveled surface between rows of berry crops are urgent scientific problems. **Aim of the Article.** To identify the basic parameters for the interaction of a spherical disk with waterlogged soil and on this basis to develop the technical solution for reducing the distance of soil throwing away in space between rows of berry crops.

Materials and Methods. The object of research is an orchard disc harrow equipped with a protective shield mounted in front of the outermost disc of the tool front panel. The subject of the research is the process of interaction of the end disc of the front harrow plate with the waterlogged soil in berry plantations. The length of the protective shield and its spatial orientation were chosen as optimization parameters for field experiments. The quality evaluation of intertillage of the berry plantations was carried out by profiling their surfaces.

Results. Based on the results of theoretical studies, it was found that the angle of inclination of the protective shield in the horizontal plane should be within 53–54°, and with respect to the movement of the harrow – 50–58°. The results of field experiments have confirmed the theoretical conclusions. It has been established that only a protective shield, the length of which is 450 mm and the installation angle of 50°, allows completely eliminating the side throw of the soil beyond the width of the tool. In addition, these parameters ensure the stable operation of the disc tool in almost any soil moisture and weed infestation of space between berry bushes.

Discussion and Conclusion. The use of a modernized tillage tool made it possible to exclude the soil throwing into the bush zone to increase the speed of the unit by 25%.

Keywords: space between rows of berry crops, soil throwing, disc harrow, spherical disc, protective shield

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

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

For citation: Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Improving the Design of the Disc Harrow for Berry Plantations. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):219–236. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.219-236>

Введение

Содержание почвы в междурядьях многолетних насаждений решает целый комплекс задач технологического плана. Во-первых, корневая система культурных растений должна беспрепятственно развиваться в корнеобитаемом слое, в связи с чем почва в нем должна иметь оптимальную плотность [1; 2]. Указанное требование обусловлено также и необходимостью обеспечения приемлемой скорости фильтрации воды. В противном случае во время интенсивного дождя усиливается ее поверхностный сток, что способствует развитию процесса водной эрозии. Так, по данным ученых, в зоне многократного прохода ходовой части тракторов фильтрующая способность поверхности междурядий сада оказалась в 5–7 раз меньше, чем в приштамбовой (или межкустовой) зоне плантации, для которой характерно естественное сложение почвы [3; 4].

От состояния и способа содержания междурядий зависит и водный режим культурных растений, являющийся одним из лимитирующих факторов урожайности¹. Так, даже в условиях Брестской области Белоруссии, традиционно относившейся к зоне достаточного увлажнения, стабильное поддержание влажности почвы на уровне 80 % от ее предельной полевой влагоемкости гарантирует по сравнению с естественным увлажнением прибавку урожая ягод малины в 1,8 раза [5; 6].

Проблему стабильного обеспечения ягодных культур влагой с точки зрения содержания междурядий можно разбить на два самостоятельных направления: борьбу с сорняками как конкурентами культурных растений за воду и технологические мероприятия по уменьшению интенсивности ее испарения. Одним из таких мероприятий является

мульчирование междурядий соломой. Такой практический опыт есть на виноградниках в Германии [7–9] и на чайных плантациях в Японии [10; 11]. Аналогичный опыт, заложенный на плантации малины в с. Кокино (Выгоничский район Брянской области), показал, что с точки зрения угнетения роста сорняков прием оказался эффективным [12; 13]. Однако в течение летнего сезона из-под слоя соломы в междурядьях прорастает малина, которую необходимо регулярно удалять. Кроме того, ряды малины требуют регулярного механического ограничения для формирования оптимальной густоты ее стеблестоя [14]. Таким образом, полностью исключить механическую обработку междурядий при их мульчировании соломой не представляется возможным².

Что касается минимизации испарения влаги, то для этого необходимо поддерживать поверхностный слой междурядья в рыхлом состоянии, вследствие чего прекращается приток влаги из нижних горизонтов почвы в результате разрушения ее капиллярной системы. Вторым важным условием уменьшения испаряемости влаги на ягодной плантации является поддержание поперечного профиля поверхности междурядий в выровненном состоянии. В результате уменьшается площадь испаряющей поверхности, что также обеспечивает минимизацию интенсивности этого негативного процесса³.

Таким образом, механическая обработка почвы в междурядьях ягодных кустарников остается актуальной технологической операцией, обеспечивающей не только уменьшение интенсивности испарения влаги и борьбу с сорняками, но и поддержание плантации в приемлемом состоянии с точки зрения возможности эффективного использования

¹ Система биологизации земледелия Нечерноземной зоны России. Часть 1 / под ред. В. Ф. Мальцева, М. К. Каюмова. М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2002. 544 с.

² Ягодные культуры в Центральном регионе России / И. В. Казаков [и др.]. М. : Всерос. селекционно-технологический ин-т садоводства и питомниководства, 2016. 233 с.

³ Ярославцев Е. И. Малина. М. : Агропромиздат, 1987. 208 с.

ягодоуборочной техники [15; 16]. Для этого ширина ряда у его основания не должна превышать 0,3–0,4 м, а вдоль основания рядов не должны формироваться почвенные валы, препятствующие максимальному снижению нижней границы зоны улавливания ягод комбайном и уменьшению вследствие этого их потерь [17; 18]. Следовательно, целесообразно оптимизировать как технологию механической обработки почвы в междурядьях ягодных кустарников, так и конструкцию наиболее подходящих для этого почвообрабатывающих орудий.

Обзор литературы

Изначально для обработки почвы в междурядьях ягодных кустарников и плодового сада использовали те же рабочие органы и машины, что и для сплошной обработки, при их соответствующей адаптации к специфическим условиям. По сути, адаптация заключалась в приведении ширины захвата орудия к ширине междурядья.

Как правило, ягодные кустарники высаживают с расстоянием между рядами 3 м⁴. Однако они разрастаются в ширину, и если их не ограничивать принудительно, то обрабатываемая полоса на плантации малины со временем может сузиться до 1,5 м, особенно если не практикуется специальная операция по ограничению ширины ее рядов [14]. Аналогичный процесс происходит и на плантации смородины, поскольку габитус ее кустов также со временем увеличивается в ширину, заполняя пространство междурядья. Таким образом, одной из специфических особенностей ягодной плантации является изменение ширины обрабатываемой полосы в течение срока ее существования. Максимальную ширину обрабатываемая

полоса имеет в первый год после посадки (до 2,8 м), уменьшаясь затем до 2,3–2,5 м. Более того, ряды могут разрастаться несимметрично по отношению к исходной линии посадки, а почвообрабатывающий агрегат должен иметь запас на неточность вождения по условной осевой линии междурядья или защитную зону, шириной 0,1–0,2 м. Исходя из этих соображений и назначали ширину захвата для орудий, предназначенных для работы на ягодной плантации⁵.

Так, культиватор КМК-2,6, оборудованный стрельчатыми лапами и боковыми плоскорежущими ножами, мог быть настроен на минимальную ширину захвата 1,5 м, которая при необходимости могла быть увеличена до 2,1–2,6 м. То есть при максимальном разрастании рядов в ширину боковые подрезающие ножи не использовали. Технологическим аналогом рассмотренного культиватора являлся плуг-рыхлитель виноградниковый ПРВМ-3, который достаточно широко применялся для глубокого рыхления почвы на ягодниках. Его можно было настроить на обработку полосы шириной не менее 2 м. Сведения об актуальности указанных орудий встречаются и в литературе последнего десятилетия⁶ [19].

Для работы в тяжелых почвенных условиях и при сильной засоренности междурядий предназначена горизонтальная садовая фреза ФПШ-200, которую можно было настраивать на ширину захвата 1,45; 1,78; 1,87; 2,20 и 2,62 м [20; 21]. Однако горизонтальная фреза сильно распыляет и иссушает почву. Кроме того, она чрезмерно сложная и энергоемкая⁷ [22–24].

Попытка исключить негативные аспекты использования горизонтальной фрезы привели к разработке вертикально

⁴ Казаков И. В. Малина. Ежевика. М. : АСТ, 2001. 256 с.

⁵ Аниферов Ф. Е., Ерошенко Ф. Е., Теплинский И. З. Машины для садоводства. Л. : Агропромиздат, 1990. 304 с.

⁶ Лурье А. Б., Громбчевский А. А. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин. Л. : Машиностроение, 1977. 528 с.

⁷ Халанский В. М., Горбачев И. В. Сельскохозяйственные машины. М. : КолосС, 2003. 624 с.

фрезерного культиватора КВФ-2М, который устойчиво работал при практически любой степени засоренности междурядий и при этом не перемешивал почвенные слои. Более того, он мог рыхлить почву под слоем соломенной мульчи, сохраняя ее при этом на 70–75 % на поверхности междурядья [12].

Тем не менее и эта машина достаточно сложная и энергоемкая для того, чтобы стать базовым средством механизации обработки почвы на ягодной плантации. Поэтому максимально широкое распространение в отечественном ягодоводстве получила простая и надежная дисковая борона БДН-1,3А [25–27]. В связи с асимметричностью компоновки ее батарей имеется возможность обеспечить устойчивость работы в горизонтальной плоскости при боковом выносе рабочих органов вправо по отношению к продольной оси трактора⁸.

Это особенно важно для обработки почвы под кроной разросшихся кустов смородины, чтобы трактор оставался в центре междурядья и не повреждал ветви и ягоды. С этой же целью предусмотрено и наличие дополнительной подрезающей секции, копирующей основания кустов и обрабатывающей прикустовую полосу с оставлением минимальной ширины защитной зоны. При этом предполагается, что междурядье обрабатывается минимум за два прохода (туда и обратно) при асимметрии расположения каждой обрабатываемой полосы по отношению к условной осевой линии междурядья.

Что касается плантации малины, то наш опыт свидетельствует о том, что дополнительная секция не обеспечивает надлежащего качества формирования густоты стеблестоя в рядах и их стабильной ширины. В связи с этим признано целесообразным использовать для обработки прикустовой полосы (с одновременным ограничением ширины ряда) специальный вертикально-фрезерный

ограничитель, а ширину захвата дисковой бороны увеличить по сравнению с серийной БДН-1,3А до 1,5 м [13; 14; 28]. Такое орудие удачно комплектуется дисковыми батареями от бороны БДН-3.

Анализ ситуации был бы не полным без упоминания нового класса дисковых орудий – дискаторов [29]. Их конструктивное отличие от дисковой бороны заключается в установке каждого диска на индивидуальной ступице, а не на общей оси батареи. Это приводит к существенному изменению характера движения почвы после ее схода с диска. У дисковой бороны отрезанная от почвенного монолита лента упирается в выпуклую поверхность соседнего диска и только после этого отбрасывается в сторону. При небольшом повышении влажности почвы происходит ее налипание на диск и постепенное заполнение междискового пространства. Для исключения такого сценария взаимодействия между дисками устанавливают специальные чистики, которые существенно увеличивают энергоемкость процесса.

При взаимодействии с почвенной лентой дискатора она минует выпуклую поверхность соседнего диска, в принципе, исключая возможность забивания междискового пространства. Это позволяет дискатору устойчиво работать на переувлажненной почве даже при ее сильной засоренности. Такие очевидные преимущества привели к тому, что дискаторы стали использовать и для обработки междурядий в многолетних насаждениях [30].

Следует отметить, что конструкция дискаторов пока не оптимизирована до конца. Более того, продолжают дискуссии о преимуществах двух- или четырехрядного размещения дисков [31]. При этом присутствует и неоднозначность в их классификации и технологической аналогии традиционным дисковым орудиям (луцильникам

⁸ Кленин Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М. : Колос, 1994. 750 с.

и боронам)⁹. Это вызывает большие проблемы с идентификацией импортируемых почвообрабатывающих орудий таможенной при начислении ввозной пошлины, которые обусловлены тем, что начавшие действовать в 1969 г. ГОСТ 7245-69 (регламентирующий основные параметры лушильников) и ГОСТ 10267-69 (касающийся важнейших показателей, характерных для дисковых борон) не могли учитывать особенности конструкции современных дискаторов¹⁰ [32].

Технологические преимущества дискаторов успешно реализуются в крупных сельхозпредприятиях, специализирующихся на производстве основных полевых культур. Что касается ягодоводства, то для этой подотрасли АПК характерны небольшие хозяйства, в связи с чем значимую роль при использовании дискаторов начинает играть их чрезмерно высокая цена. Она обусловлена необходимостью монтажа каждого диска на индивидуальной ступице, снабженной двумя подшипниками качения, тогда как на восемь дисков батареи дисковой бороны приходится всего два корпуса и два подшипника качения [32–34]. В связи с этим экономически оправдано дальнейшее совершенствование конструкции дисковой бороны с ее максимальной адаптацией к условиям многолетних насаждений, в частности плантации малины.

Важнейшей технологической проблемой для дисковых орудий является чрезмерный боковой отброс почвы крайним диском передней батареи. В конструкции традиционной дисковой бороны БДН-1,3А была предпринята попытка решения проблемы за счет дополнительного сдвига вправо на величину Δb задней батареи 2 (рис. 1).

Предполагалось, что крайний диск задней батареи 2 сможет захватить всю почву 3, отброшенную вправо крайним диском ее передней батареи 1 и вернуть этот объем на прежнее место. При этом величина Δb порядка 0,1 м, поскольку конструкторы рассчитывали на расстояние отброса, характерное для спелой почвы оптимальной влажности.

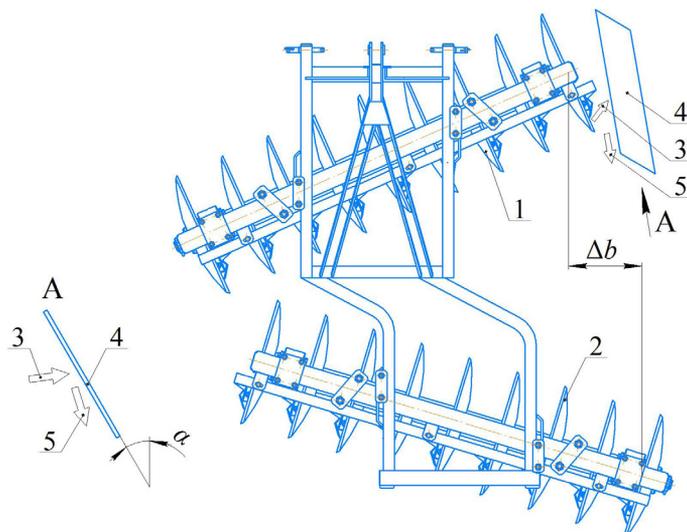
Однако, как правило, обработку приходится проводить при менее благоприятных условиях. Так, если влажность почвы повышена по сравнению с оптимумом, обеспечивающим ее хорошее крошение, то она отбрасывается на большее расстояние [35]. Положение усугубляется тем, что механизаторы традиционно превышают рекомендуемые рабочие скорости, существенно увеличивая поперечный отброс почвы. В результате в абсолютном большинстве сельхозпредприятий ягодоводческой специализации поперечный профиль междурядий имел в 1980–1990-е гг. корытообразную форму (рис. 2) уже на 4–5 год эксплуатации плантации¹¹ [36].

На первом этапе разработки была предпринята попытка решить проблему за счет увеличения поперечного сдвига Δb между передней и задней батареями до 0,4 м. Качество работы существенно улучшилось, но полностью исключить чрезмерный боковой отброс почвы не удалось. При этом не удалось решить проблему и путем использования фрезерного ограничителя ряда, ножи которого перемещают почву в сторону междурядья [14]. Дело в том, что отдельные фрагменты отбрасываемой крайним диском передней батареи почвенной ленты достигали оснований рядов малины и проникали между стеблями, в связи с чем возврат почвы в междурядье становился невозможным.

⁹ Сохт К. А., Трубилин В. И., Коновалов Е. И. Дисковые бороны и лушильники. Проектирование технологических параметров : учеб. пособие. Краснодар : Изд-во Кубан. аграр. ун-та, 2014. 165 с.

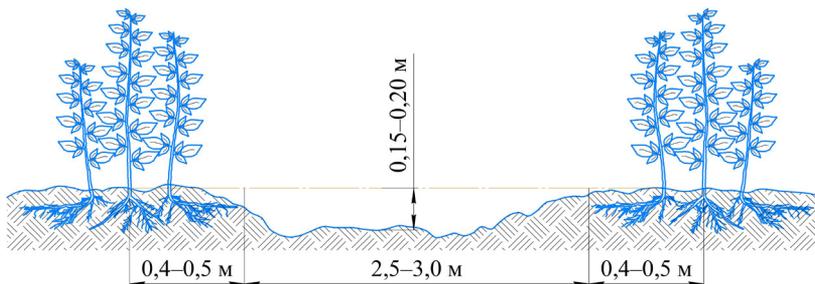
¹⁰ Классификация дисковых борон (дискаторов) [Электронный ресурс]. URL: https://agristo.ru/Article/ar_klassif_disk_boron.html (дата обращения: 22.02.2023).

¹¹ Никитин В. В. Улучшение качества обработки междурядий ягодных кустарников в условиях суглинистых почв повышенной влажности путем совершенствования конструктивно-режимных параметров дисковой бороны : дис... канд. техн. наук. Брянск, 2009. 165 с.



Р и с. 1. Схема модернизированной садовой дисковой бороны для ягодников:
1 – батарея дисков передняя; 2 – батарея дисков задняя; 3 – лента отбрасываемой диском почвы;
4 – щиток защитный; 5 – почва после контакта с защитным щитком

F i g. 1. Scheme of a modernized garden disc harrow for berry plantations:
1 – front disc battery; 2 – rear disc plate; 3 – soil discarded by the disc; 4 – protective shield;
5 – soil after contact with the protective shield



Р и с. 2. Корытообразная форма поверхности междурядий ягодников
на 4–5 год эксплуатации плантации

F i g. 2. Trough shape of the space between rows of berry crops in 4–5 years of operating plantations

Вследствие этого необходимо было более подробно изучить механизм образования и движения отбрасываемой вбок почвенной ленты, на основании чего осуществить модернизацию дисковой бороны.

Цель исследования – определить основные параметры процесса взаимодействия сферического диска с переувлажненной почвой и на этой основе разработать техническое решение,

позволяющее уменьшить дальность отброса почвенной ленты в условиях междурядий ягодных культур.

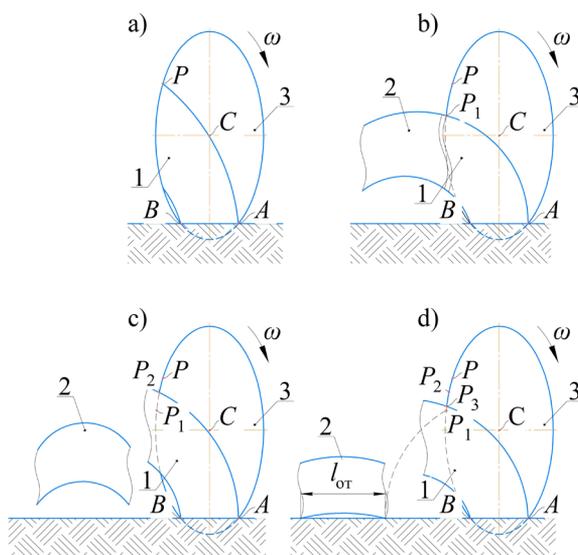
Материалы и методы

Движение почвенной ленты, отрезанной крайним диском передней батареи орудия по его рабочей поверхности, условно можно разделить на следующие фазы. Подъем переувлажненной, уплотненной и задернелой почвенной ленты по вогнутой поверхности сферического

диска из точки A в точку P , как правило, происходит без ее разрушения (рис. 3 а). Отрезанная почвенная лента 1 при выходе за пределы диска 3 продолжает свое движение по криволинейной траектории, соответствующей радиусу кривизны рабочего органа и углу атаки (рис. 3 б). При этом длина отделившейся почвенной ленты носит вероятностный характер и зависит от ее физико-механических свойств. Далее под действием собственного веса и сил инерции консольная часть пласта почвы 2 отделяется от монолита и совершает свободное падение под углом к горизонту (рис. 3 с). При этом дальний край отделившейся части почвенной ленты 2 оказывается отброшенным дальше на ее длину $l_{от}$ в сравнении с отдельно взятой материальной точкой полностью

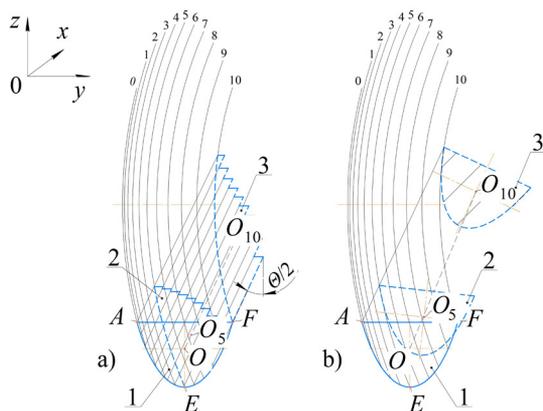
разрушенного пласта (рис. 3 д). Момент от сил трения увлекает за собой контактирующий пласт почвы 1 с рабочим органом и поднимает его в точку P_2 (рис. 3 с). Дальнейшее перемещение борона приводит к удлинению выступающей части почвенного пласта 1 за пределы диска и его сползанию вниз в направлении точек P_3 и P_1 (рис. 3 д). Эта гипотеза была принята в качестве основной при проведении теоретических исследований.

При описании характера поведения почвенной ленты с рабочей поверхностью сферического диска передней батареи орудия и определении траектории ее перемещения в пространстве, пласт почвы был смоделирован в виде двух реологических моделей простых идеальных тел (рис. 4) [37].



Р и с. 3. Фазы движения почвенной ленты при обработке междурядий ягодников: а) подъем почвенной ленты по диску; б) выход почвенной ленты за пределы диска и ее отделение от монолита; в) свободное падение отделившейся части почвенной ленты на поверхность междурядья; д) конечная фаза; 1 – контактирующая с диском часть почвенной ленты; 2 – часть почвенной ленты, вышедшей за пределы диска; 3 – сферический диск

F i g. 3. Phases of soil movement during intertillage of berry crops: a) the rise of the soil slice on the disk; b) the exit of the soil slice outside the disk and its separation from the monolith; c) the free fall of the separated part of the soil slice on the surface of the aisle; d) the final phase; 1 – the part of the soil slice in contact with the disk; 2 – part of the soil slice that has gone beyond the disk; 3 – spherical disk



Р и с. 4. Характер поведения почвенной ленты с рабочей поверхностью сферического диска передней батареи орудия: а) идеально пластичная модель; б) идеально упругая модель; 1 – начальное положение пласта почвы; 2 – почвенный пласт прошел половину рабочей поверхности сферического диска; 3 – почвенный пласт прошел всю рабочую поверхность сферического диска

Fig. 4. Character of interaction of soil slice with the working surface of the spherical disc of the front tool plate: a) an ideally plastic slice; b) an ideally elastic slice; 1 – the initial position of the soil slice; 2 – the soil slice has penetrated half of the working surface of the spherical disk; 3 – the soil slice passed the entire working surface of the spherical disk

В первом случае реологическая модель почвенного пласта была представлена в виде идеально пластичного тела, деформация поперечного сечения которого происходит посредством относительного перемещения его слоев под углом к вертикальной плоскости $\Theta / 2 = 25^\circ$ (рис. 4 а). Во втором случае – идеально упругое тело, поперечное сечение, которого под действием внешних сил не деформируется (рис. 4 б). При этом для всех случаев почвенная лента не сжимается и не деформируется в продольном направлении.

Теоретические исследования проводили при следующих фиксированных параметрах: поступательная скорость дисковой бороны $v = 7,3$ км/ч, угол атаки $\alpha = 20^\circ$ и глубина обработки почвы $a = 8$ см.

Положение центра тяжести почвенной ленты (точка O , рис. 4) определяли в программе «КОМПАС-3D» посредством сечения сферического диска десятью параллельными плоскостями,

сориентированными перпендикулярно по отношению к направлению движения дисковой бороны [38]. Полученные по результатам построения точки были аппроксимированы полиномом третьей степени, что позволило при его дифференцировании определить скорость и ускорение пласта почвы при разных положениях его на рабочей поверхности сферического диска.

На основании модели поведения почвенной ленты за пределами диска установлено, что ее отброс превышает величину поперечного сдвига Δb между батареями почвообрабатывающего орудия (рис. 1). В связи с этим было решено разместить на пути движения почвенной ленты защитный щиток, установленный к ее траектории под углом меньшим, чем угол трения почвы по стали, и сориентированный по нормали к его поверхности в направлении максимальных суммарных напряжений. Это должно существенным образом уменьшить энергозатраты на ее разрушение.

По результатам теоретических исследований был проведен полевой эксперимент с модернизированной дисковой бороной, снабженной защитным щитком (рис. 5). Его конструкция признана изобретением [39]. Исследования были разбиты на два этапа. При проведении первой серии полевых экспериментов в качестве оптимизационных параметров выбран угол установки щитка в горизонтальной плоскости (30, 50, 70 и 90°) и его длина (250, 350 и 450 мм). Эксперимент выполняли на плантации малины при скорости движения орудия 7,3 км/ч и угле атаки 21°. Механический состав почвы – средний суглинок.

Во второй серии полевых экспериментов оценивали характер перераспределения почвенной ленты при ее взаимодействии со щитком (рис. 6). Все исследования проводили на поворотных полосах, при демонтированной задней батарее дискового почвообрабатывающего орудия. Влажность почвы после затяжных дождей составляла 28 %. Дисковая борона в агрегате с трактором МТЗ-82 проходила опытную делянку на скорости 7,3 км/ч при фиксированном

угле атаки 21°. После прохода дискового орудия выполняли профилирование обработанной поверхности через каждые 5 см.

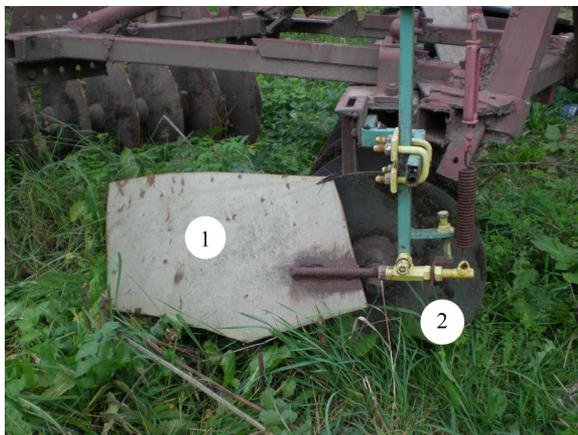
Выбор поворотных полос при проведении второй серии полевых экспериментов обусловлен тем, что дальность отброса почвенной ленты часто превышает ширину защитной зоны между крайним диском и основанием ряда ягодных кустарников. Вследствие этого фрагменты почвы неизбежно попадают внутрь кустов, исключая возможность корректного учета дальности ее отброса. Искажающее воздействие на результат может оказывать и корытообразность исходного поперечного профиля между рядов.

Результаты исследования

Перемещение центра масс поперечного сечения почвенной ленты в абсолютном движении описывается следующим уравнением:

– для идеально пластичной модели почвенной ленты

$$\begin{cases} x = 8,12t^3 + 0,12t^2 - 0,042t + 0,0005 \\ y = -2,02t^3 + 2,70t^2 - 0,102t + 0,0009; (1) \\ z = -5,04t^3 + 6,19t^2 - 0,274t + 0,0022 \end{cases}$$



Р и с. 5. Модернизированная дисковая борона с защитным щитком: 1 – защитный щиток; 2 – передняя батарея почвообрабатывающего орудия

F i g. 5. Modernized disc harrow with a protective shield: 1 – protective shield; 2 – front tillage tool plate



Р и с. 6. Оценка гребнистости поворотных полос после их обработки модернизированной садовой дисковой бороной

Fig. 6. Evaluation of ridging of rotary strips after their treatment with a modernized garden disc harrow

– для идеально упругой модели почвенной ленты

$$\begin{cases} x = 5,34t^3 + 1,21t^2 - 0,059t + 0,0006 \\ y = -2,31t^3 + 2,39t^2 + 0,027t - 0,0006; (2) \\ z = -6,72t^3 + 6,13t^2 + 0,002t - 0,0002 \end{cases}$$

где t – время перемещения почвенной ленты, с.

Кроме получения на этой основе значений для всех составляющих скорости и ускорения в точке схода пласта с поверхности диска был сделан важный вывод о том, что существенную роль в разрушении пласта на сферическом диске играют силы инерции. Этим и объясняется тот факт, что с ростом скорости движения диска увеличивается и степень крошения пласта.

Методами аналитической геометрии определено пространственное положение защитного щитка:

– для идеально пластичной модели почвенной ленты

$$1,87x - 1,56y - 1,78z + 2,66 = 0; (3)$$

– для идеально упругой модели почвенной ленты

$$2,01x - 1,27y - 1,78z + 2,54 = 0, (4)$$

где x, y, z – положение текущих координат щитка, м.

Полученные уравнения свидетельствуют о том, что защитный щиток целесообразно ориентировать по отношению к горизонту под углом $53-54^\circ$, а по отношению к направлению движения – $50-58^\circ$.

По результатам первой серии полевых экспериментов установлено, что полностью исключить боковой отброс почвы за пределы ширины захвата орудия

позволяет только защитный щиток, длина которого составляет 450 мм, а угол установки – 50°. При этом устойчивая работа дискового орудия обеспечивалась практически при любой влажности и засоренности междурядий ягодных кустарников. При меньших значениях угла установки защитного щитка к горизонту (30°) наблюдался вынос почвенной ленты за пределы ширины захвата дискового орудия, а при больших (70 и 90°) – сгуживание и волочение почвенно-стебельчатой массы.

По результатам второй серии полевых экспериментов, полученных при исследовании гребнистости, построен поперечный профиль поверхности поворотной полосы при ее обработке модернизированной дисковой бороной (рис. 7). На нем сплошной линией показан поперечный профиль поверхности поворотной полосы перед проходом дискового орудия, пунктирной – после.

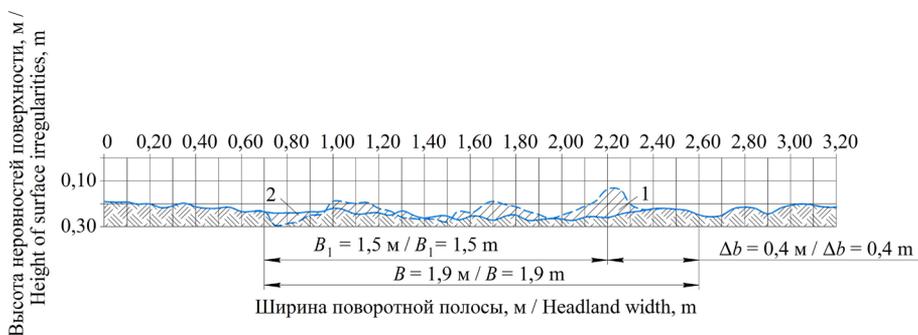
Построенный профиль свидетельствует о том, что боковой отброс почвенной ленты в условиях ягодников не превышает ширины захвата модернизированной дисковой бороны. Установка задней секции и дискование поверхности

междурядий плантации в два прохода (туда и обратно) обеспечивает практически полный возврат почвы в ее исходное положение.

Обсуждение и заключение

1. Принятая теоретическая гипотеза взаимодействия почвы повышенной влажности с крайним сферическим диском передней батареи дисковой бороны адекватно описывает процесс формирования почвенной ленты и убедительно объясняет механизм ее отброса за пределы ширины захвата орудия. Поскольку при этом свойства почвы варьируются в широких пределах, то не исключается заброс отдельных ее фрагментов внутрь плодовой стенки малины, вследствие чего неизбежно формирование корытообразного профиля поверхности междурядья, который после этого в принципе невозможно исправить даже посредством применения дополнительных (или специальных) рабочих органов или орудий.

2. Размещение на пути движения почвенной ленты защитного щитка, установленного к ее траектории под углом меньшим, чем угол трения почвы по стали, и ориентация нормали к его поверхности по направлению максимальных



Р и с. 7. Поперечный профиль поворотной полосы ягодников при их обработке модернизированной дисковой бороной: 1 – почвенный вал; 2 – разъемная борозда; Δb – величина поперечного сдвига между передней и задней секциями;

B – ширина захвата дискового орудия; B_1 – ширина захвата передней секцией

Fig. 7. Cross-sectional profile of the turntable of berry bushes during their processing with a modernized disc harrow: 1 – soil shaft; 2 – detachable furrow; Δb – is the value of the transverse shift between the front and rear sections; B – the width of the disk tool; B_1 – width of the front section

суммарных напряжений в отбрасываемом почвенном массиве обеспечивает устойчивую работу орудия практически при любой влажности и засоренности междурядий ягодных кустарников.

3. Защитный щиток целесообразно сориентировать по отношению к горизонту под углом 53–54°, а по отношению к направлению движения – 50–58°.

4. Многолетнее использование модернизированной дисковой бороны на плантациях малины и смородины

крестьянского фермерского хозяйства «Ягодное» (Выгоничский район Брянской области) подтверждает высокое качество и надежность ее работы. На протяжении всего срока возделывания насаждений сохранялся выровненный поперечный профиль поверхности междурядий.

5. Использование модернизированного почвообрабатывающего орудия для обработки поверхности междурядий ягодников позволило увеличить скорость движение агрегата на 25 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальные исследования по разработке автоматизированной системы регулирования плотности почвы посевной машины / А. С. Дорохов [и др.] // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 9–15. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-9-15>

2. Significance of Root Hairs for Plant Performance under Contrasting Field Conditions and Water Deficit / M. Marin [et al.] // *Annals of Botany*. 2021. Vol. 128, issue 14. P. 1–16. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa181>

3. Хабаров С. Н. Обработка почвы в садах Сибири // *Садоводство*. 1983. № 12. С. 14–15.

4. The Content of Vitamin C in the Grape Grown under the Conditions of Southwestern Siberia / I. D. Borodulina [et al.] // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2021. Vol. 47, issue 7. P. 1451–1456. <https://doi.org/10.1134/S1068162021070037>

5. Волчек А. А., Рой Ю. Ф., Санелина Е. А. Эффективность капельного орошения малины ремонтантной в условиях юго-западной части Беларуси // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2015. № 41. С. 118–121.

6. Improving the Process of Hose-sprinkler for Irrigation of Small Areas / G.V. Olgarenko [et al.] // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2019. Vol. 11, issue S2. P. 431–438. EDN: LDHGUJ

7. Uhl W. Neues Mechanisierungsverfahren zur Stroddungung // *Dtsch. Weinbau*. 1988. Vol. 43, issue 14. P. 691–694.

8. Panagos P., Katsoyiannis A. Soil Erosion Modelling: The New Challenges as the Result of Policy Developments in Europe // *Environmental Research*. 2019. Vol. 172. P. 470–474. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.043>

9. Skarbek C. J., Dormann C. F., Kobel-Lamparski A. Trends in Monthly Abundance and Species Richness of Carabids over 33 Years at the Kaiserstuhl, Southwest Germany // *Basic and Applied Ecology*. 2021. Vol. 50. P. 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.11.003>

10. Габуния Н. А., Кохвиашвили Д. С., Петросян С. В. Исследование энергозатрат роторного измельчителя чайных веток // *Тракторы и сельхозмашины*. 1982. № 7. С. 12–13.

11. Дидманидзе Р. Н. Технологии закладки и ухода за чайными плантациями // *Агроинженерия*. 2021. № 6 (106). С. 38–42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-38-42>

12. Ожерельев В. Н. Машина для обработки почвы при мульчировании междурядий малины // *Садоводство и виноградарство*. 1991. № 7. С. 29–30.

13. Ожерельев В. Н. Механизация ухода за малиной в крестьянском хозяйстве «Ягодное» // *Садоводство и виноградарство*. 1993. № 3. С. 17–18.

14. Ожерельев В. Н., Ожерельева М. В. Механизированная нормировка стеблей малины на плантации // *Садоводство и виноградарство*. 2000. № 1. С. 16–17.

15. Механизированный сбор ягод малины на промышленных плантациях в России / Ю. А. Утков [и др.] // История науки и техники. 2020. № 9. С. 67–82. <https://doi.org/10.25791/intstg.09.2020.1213>
16. Евсеев С. П. Алгоритм системы выбора и оценки параметров уборки смородины черной с применением цифровых агротехнологий // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 4 (109). С. 22–29. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-22-28>
17. Ramsey A. M. Mechanical Harvesting of Raspberries a Review with Particular Reference to Engineering Defelopment in Scotland // Journal of Agricultural Engineering Research. 1983. Vol. 28, issue 3. P. 183–204.
18. Primocane Raspberry Cultivars for Industrial Cultivation in Russia / S. N. Evdokimenko [et al.] // Acta Horticulturae. 2020. Vol. 1277. P. 301–306. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1277.44>
19. Бартенев В. Д., Хабаров С. Н. Комплексная механизация возделывания насаждений ягодников и облепихи // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 7 (81). С. 96–98.
20. Блохин В. Н., Случевский А. М., Орехова Г. В. Разработка конструкций рабочих органов и роторов фрез с вертикальной осью вращения для копирования корневой системы растений // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (90). С. 118–121.
21. Садовая фреза для условий предгорной зоны / А. К. Апажев [и др.] // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2021. № 3 (33). С. 75–78.
22. Study on the Reduction of Soil Adhesion and Tillage Force of Bionic Cutter Teeth in Secondary Soil Crushing / G. Chunsong [et al.] // Biosystems Engineering. 2022. Vol. 213. P. 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.018>
23. Design and Test of Resistance-Reducing Excavation Device of Cyperus Edulis Based on Discrete Element Method / X. He [et al.] // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2021. Vol. 52, issue 12. P. 124–133. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.013>
24. Design and Experiment of Driving Stubble Cutter for Corn Strip with Less Tillage Operation / J. Wang [et al.] // Nongye Jixie Xuebao. 2021. Vol. 52, issue 8. P. 51–61. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.005>
25. Примаков Н. В., Николенко А. Ю. Энергосберегающая технология подготовки почвы для закладки плодового сада // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 183. С. 234–242. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-183-023>
26. Improving the Process of Harrowing and Sowing crops / G. G. Maslov [et al.] // Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences. 2019. Vol. 6, issue 4. P. 7060–7064. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2628871>
27. Kozachenko O., Aliiev E., Sedykh K. Results of Investigation of the Spring Shank Disc Harrow Performance // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2021. Vol. 83, issue 4. P. 123–140. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/6289?mode=full> (дата обращения: 22.02.2023).
28. Ожерельев В. Н., Ожерельева М. В. Особенности применения вертикальной фрезы для обработки почвы в междурядьях малины // Агроинженерия. 2021. № 5 (105). С. 20–24. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-5-4-20-24>
29. Зимарин С. В., Четверикова И. В. Исследование процесса оборота почвенного пласта новым корпусом дискатора на нераскорчеванных вырубках // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 53–65. <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5542>
30. Припоров Е. В. Анализ полноты обработки почвы в междисковом пространстве двухследного дискового орудия // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 1 (75). С. 85–88. EDN: YXZMUH
31. Припоров Е. В., Юдт В. Ю. Анализ дисковых орудий с четырехрядным расположением сферических дисков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118 (04). С. 1413–1427. EDN: VWPTRZ
32. Тарасенко Б. Ф., Руднев С. Г., Дробот В. А. Универсальный почвообрабатывающий агрегат для малоземельных фермерских хозяйств // Политематический сетевой электронный научный

журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2021. № 174. С. 113–129. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-174-012>

33. Reasoning of Modular-Type Tillage and Seeding Machines Construction Diagram and Parameters / S. G. Mudarisov [et al.] // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. Vol. 25, issue 3. P. 695–707. EDN: LAQIJG

34. Lachuga Yu. F., Akhalaya B. Kh., Shogenov Yu. Kh. New Designs for Universal Working Bodies of Tillage and Seeding Equipment // Russian Agricultural Sciences. 2019. Vol. 45, issue 5. P. 498–502. <https://doi.org/10.3103/S1068367419050100>

35. Ожерельев В. Н., Никитин В. В., Гринь А. М. Совершенствование конструкции дисковых почвообрабатывающих орудий // Наука в центральной России. 2020. № 5 (47). С. 5–11.

36. Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Управление перераспределением почвы по ширине междурядья малины // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2011. № 4. С. 13–15.

37. Носов С. В., Перегудов Н. Е. Оценка уплотняющего воздействия и эксплуатационных характеристик гусеничного трактора на основе реологического подхода // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 1. С. 43–51. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100293>

38. Вяткина С. Г., Туркина Л. В. Решение задач по начертательной геометрии с применением трехмерного моделирования в системе Компас-3D V17 // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 4–2. С. 277–282. <https://doi.org/10.17513/snt.38010>

39. Приспособление к дисковому почвообрабатывающему орудью: патент 2344586 Российская Федерация / Ожерельев В. Н., Никитин В. В. № 2007135700/12 ; заявл. 26.09.2007 ; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3. 6 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37542926> (дата обращения: 25.02.2023).

Поступила 27.02.2023; одобрена после рецензирования 11.04.2023; принята к публикации 21.04.2023

Об авторах:

Ожерельев Виктор Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>, Researcher ID: AAD-8298-2022, Scopus ID: 57195608281, vicoz@bk.ru

Никитин Виктор Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>, ResearcherID:AAD-7368-2022, ScopusID:57201686117, viktor.nike@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В. Н. Ожерельев – научное руководство; формулирование основной концепции исследования; общее руководство экспериментальными исследованиями; проведение критического анализа результатов и формулирование выводов.

В. В. Никитин – анализ литературных данных; подготовка первоначального варианта текста и доработка текста; проведение экспериментов и обработка их результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Experimental Studies on the Development of an Automated System for Regulating the Soil Density Used in a Seeding Machine. *Agricultural Engineering*. 2021;(2):9–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-9-15>

2. Marin M., Naveed M., Hallett P.D., et al. Significance of Root Hairs for Plant Performance under Contrasting Field Conditions and Water Deficit. *Annals of Botany*. 2021;128(1):1–16. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa181>
3. Khabarov S.N. Soil Cultivation in the Gardens of Siberia. *Sadovodstvo*. 1983;(12):14–15. (In Russ.)
4. Borodulina I.D., Vorotyntseva M.V., Sokolova G.G., et al. The Content of Vitamin C in the Grape Grown under the Conditions of Southwestern Siberia. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2021;47(7):1451–1456. <https://doi.org/10.1134/S1068162021070037>
5. Volchek A.A., Roy Yu.F., Sanelina E.A. [Efficiency of Drip Irrigation of Remontant Raspberry in the Conditions of the Southwestern Part of Belarus]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2015;(41):118–121. (In Russ.)
6. Olgarenko G.V., Ryazantsev A.I., Terpigorev A.A., et al. Improving the Process of Hose-Sprinkler for Irrigation of Small Areas. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2019;11(S2):431–438. EDN: LDHGUK
7. Uhl W. Neues Mechanisierungsverfahren zur Stroddungung. *Dtsch. Weinbau*. 1988;43(14):691–694. (In Germ.)
8. Panagos P., Katsoyiannis A. Soil Erosion Modelling: The New Challenges as the Result of Policy Developments in Europe. *Environmental Research*. 2019;172:470–474. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.043>
9. Skarbek C.J., Dormann C.F., Kobel-Lamparski A. Trends in Monthly Abundance and Species Richness of Carabids Over 33 Years at the Kaiserstuhl, Southwest Germany. *Basic and Applied Ecology*. 2021;50:107–118. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.11.003>
10. Gabunia N.A., Kokhviashvili D.S., Petrosyan S.V. Study of the Energy Consumption of a Rotary Grinder of Tea Branches. *Traktory i selkhoz mashiny*. 1982;(7):12–13. (In Russ.)
11. Didmanidze R.N. Tea Plantation Establishing and Care Technologies. *Agricultural Engineering*. 2021;(6):38–42. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-38-42>.
12. Ozherelev V.N. A Machine for Tillage during Mulching of Raspberry Rows. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1991;(7):29–30. (In Russ.)
13. Ozherelev V.N. Mechanization of Care for Raspberries in the Farm Yagodnoe. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1993;(3):17–18. (In Russ.)
14. Ozherelev V.N., Ozhereleva M.V. Mechanized Normalization of Raspberry Stems on Plantations. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 2000;(1):16–17. (In Russ.)
15. Utkov Yu.A., Filippov R.A., Hort D.O., Kutuyev A.I. Mechanized Picking of Raspberries on Industrial Plantations in Russia. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2020;(9):67–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25791/intstg.09.2020.1213>
16. Evseev S.P. Algorithm of the System for Choosing and Estimating Parameters of Black Currant Harvesting with the Use Digital Agrotechnologies. *AgroEkoInzheneriya*. 2021;(4):22–29. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-22-28>.
17. Ramsey A.M. Mechanical Harvesting of Raspberries a Review with Particular Reference to Engineering Development in Scotland. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1983;28(3):183–204.
18. Evdokimenko S.N., Sazonov F.F., Podgaetsky M.A., Skovorodnikov D.N. Primocane Raspberry Cultivars for Industrial Cultivation in Russia. *Acta Horticulturae*. 2020;1277:301–306. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1277.44>
19. Bartenev V.D., Khabarov S.N. Complex Mechanization of Cultivation of Berry and Sea Buckthorn Plantations. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011;(7):96–98. (In Russ.)
20. Blokhin V.N., Sluchevsky A.M., Orekhova G.V. Development of Designs of Working Bodies and Rotors of Cutters with a Vertical Axis of Rotation for Copying the Root System of Plants. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021;(4):118–121. (In Russ.)
21. Apazhev A.K., Egozhev A.M., Polishchuk E.A., Egozhev A.A. Garden Cutter for the Conditions of the Foothill Zone. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova*. 2021;(3):75–78. (In Russ.)

22. Chunsong G., Jingjing F., Lei X., et al. Study on the Reduction of Soil Adhesion and Tillage Force of Bionic Cutter Teeth in Secondary Soil Crushing. *Biosystems Engineering*. 2022;213:133–147. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.018>
23. He X., Zhang X., Zhao Z., et al. Design and Test of Resistance-Reducing Excavation Device of *Cyperus Edulis* Based on Discrete Element Method. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2021;52(12):124–133. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.013>
24. Wang J., Zhao S., Yang Z., et al. Design and Experiment of Driving Stubble Cutter for Corn Strip with Less Tillage Operation. *Nongye Jixie Xuebao*. 2021;52(8):51–61. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.005>
25. Primakov N.V., Nikolenko A.Yu. Energy-Saving Technology of Soil Preparation for the Laying of an Orchard. *Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;(183):234–242. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-183-023>
26. Maslov G.G., Lavrentev V.P., Yudina E.M., Taran A.D Improving the Process of Harrowing and Sowing Crops. *Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2019;6(4):7060–7064. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2628871>
27. Kozachenko O., Aliiev E., Sedykh K. Results of Investigation of the Spring Shank Disc Harrow Performance. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2021;83(4):123–140. Available at: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/6289?mode=full> (accessed 22.02.2023).
28. Ozherelev V.N., Ozhereleva M.V. Peculiarities of Using the Vertical Rotary Cultivator for Inter-Row Soil Tillage of Raspberry Plantings. *Agricultural Engineering*. 2021;(5):20–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-5-4-20-24>
29. Zimarin S.V., Chetverikova I.V. The Study of the Process of Soil Layer Body Turnover with a Disc Cutter on Ungrubbed Clearings. *Resources and Technology*. 2021;18(1):53–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5542>
30. Priporov E.V. Analysis of the Completeness of Soil Cultivation in the Inter-Disk Space of a Two-Track Disk Tool. *Orenburg State Agrarian University Bulletin*. 2019;(1):85–88. (In Russ.) EDN: YXZMUH
31. Priporov E.V., Yudit V.Yu. Analysis of Disk Tools with a Four-Row Arrangement of Spherical Disks. *Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016;(118):1413–1427. (In Russ.) EDN: VWPTRZ
32. Tarasenko B.F., Rudnev S.G., Drobot V.A. Universal Tillage Unit for Small Land Farming. *Politematicheskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(174):113–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-174-012>
33. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Rakhimov R.S., et al. Reasoning of Modular-Type Tillage and Seeding Machines Construction Diagram and Parameters. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2019;25(3):695–707. (In Russ.) EDN: LAQIJG
34. Lachuga Yu.F., Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh. New Designs for Universal Working Bodies of Tillage and Seeding Equipment. *Russian Agricultural Sciences*. 2019;45(5):498–502. <https://doi.org/10.3103/S1068367419050100>
35. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Grin A.M. Improving the Design of Disc Harrows. *Nauka v tsentralnoy Rossii*. 2020;(5):5–11. (In Russ.)
36. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Management of Soil Redistribution along the Row Spacing of Raspberries. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2011;(4):13–15. (In Russ.)
37. Nosov S.V., Peregudov N.E. [Evaluation of the Compacting Effect and Operational Characteristics of a Caterpillar Tractor based on a Rheological Approach]. *Traktory i selkhoz mashiny*. 2022;89(1):43–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100293>
38. Vyatkina S.G., Turkina L.V. [Solving Problems in Descriptive Geometry using Three-Dimensional Modeling in the Compass-3D V17 System]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2020;(4-2):277–282. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/snt.38010>

39. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. [Additional Fixture to Polydisk Tillage Implement]. Patent 2,344,586 Russian Federation. 01 January 2009. (In Russ.) EDN: [ATCQON](#)

Submitted 27.02.2023; revised 11.04.2023; accepted 21.04.2023

About the authors:

Viktor N. Ozherelev, Dr.Sci. (Agric.), Professor of the Chair of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino, Bryansk Oblast 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>, Researcher ID: [AAD-8298-2022](#), Scopus ID: [57195608281](#), vicoz@bk.ru

Viktor V. Nikitin, Dr.Sci. (Engr.), Head of the Technical Service Chair, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino, Bryansk Oblast 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>, Researcher ID: [AAD-7368-2022](#), Scopus ID: [57201686117](#), viktor.nike@yandex.ru

Authors contribution:

V. N. Ozherelev – scientific guidance; formulating the basic concept of research; general management of experimental research; conducting a critical analysis of the results and formulating conclusions.

V. V. Nikitin – analyzing literary data; preparing the original version of the text and finalizing the text; conducting experiments and processing their results.

All authors have read and approved the final manuscript.



Анализ эффективности технологии разделения навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции

Е. В. Шалавина , Э. В. Васильев, Э. А. Папушин

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал федерального научного агроинженерного центра ВИМ (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

 shalavinaev@mail.ru

Аннотация

Введение. По применяемым интенсивным технологиям переработки свиного навоза в органическое удобрение недостаточно данных для точного расчета содержания питательных элементов в конечных продуктах и, соответственно, их доз внесения.

Цель статьи. Определить эффективность технологии переработки свиного навоза, в которую включена ректификация жидкой фракции, по количественным и качественным характеристикам навоза и конечных продуктов, а также проследить перераспределение общего азота между конечными продуктами на примере пилотного свиноводческого комплекса.

Материалы и методы. Для исследования выбран типовой свиноводческий комплекс, на котором внедрена технология переработки свиного навоза, включающая подкисление навоза, флокуляцию навоза, разделение навоза на фракции в декантерной центрифуге, ректификацию жидкой фракции, пассивное компостирование твердой фракции, длительное выдерживание жидкой фракции. Технология позволяет получать три вида конечных продуктов: твердое органическое удобрение, концентрированную жидкость (аммиачную воду) и жидкость для удобрительных поливов. Расчет количественных и качественных характеристик свиного навоза и полученных из него продуктов сделан на основании методических рекомендаций по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета РД – АПК 1.10.15.02-17. Для сопоставления результатов осуществлены экспериментальные исследования. Анализ проб проведен в аналитической лаборатории Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства в 2022 г. Пробы отбирались с трехкратной повторностью. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе MS Excel.

Результаты исследования. Рассчитаны количественные и качественные характеристики свиного навоза, его твердой и жидкой фракции, а также конечных продуктов. Расчетные значения сравнивались со значениями из протоколов лабораторных анализов. Различие между расчетными и фактическими значениями не превышает 10,2 %, что говорит о достоверности расчетов.

Обсуждение и заключение. Внедрение на свиноводческом комплексе новой технологии позволило снизить эмиссии в атмосферу на 10 % за счет сохранности азота, сократить эксплуатационные затраты на транспортировку органического удобрения на 47 % посредством концентрации питательных веществ в меньшем объеме и повысить плодородие почв с помощью удобрительных поливов.

© Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А., 2023



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

Ключевые слова: свиноводческий комплекс, технология, навоз, флокуляция, ректификация, общий азот, органические удобрения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за указанные замечания, которые позволили повысить качество статьи.

Для цитирования: Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А. Анализ эффективности технологии разделения навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 237–255. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.237-255>

Original article

Analysis of Manure Separation Technology Efficiency into Fractions Followed by Liquid Fraction Rectification

E. V. Shalavina , E. V. Vasilev, E. A. Papushin

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Saint Petersburg, Russian Federation)

 shalavinaev@mail.ru

Abstract

Introduction. There is not enough data on the used intensive technologies of processing pig manure into organic fertilizer to accurately calculate the content of nutrients in the final products and, accordingly, their doses of application.

Aim of the Article. To determine the efficiency of pig manure processing technology, which includes liquid fraction rectification, by the quantitative and qualitative characteristics of manure and final products, and to trace the redistributing total nitrogen between the final products on the example of a pilot pig breeding complex production.

Materials and Methods. For the study, there was chosen a typical pig-breeding complex, where the pig manure processing included slurry acidification, flocculation, separation into fractions in a decanter centrifuge, rectification of liquid fraction, passive composting of solid fraction, and long-term storing of liquid fraction. The technology allows producing three types of end products: solid organic fertilizer, concentrated liquid (ammonia water), and fertilizer solution. Quantity and quality of pig manure and the end products were calculated by the known methods. Experimental studies were performed to compare the results. Samples were analyzed in the analytical laboratory of Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production in 2022. Three replications were carried out for each sample. The experimental data were statistically analysed in MS Excel.

Results. Quantitative and qualitative characteristics of pig manure, its solid and liquid fractions, and end products were calculated. The difference between the calculated and actual values does not exceed 10.2% that indicates the reliability of calculations.

Discussion and Conclusion. The introduction of a new technology at the pig-breeding complex has reduced atmospheric emissions by 10% due to the nitrogen conservation, has reduced operating costs for transporting organic fertilizer by 47% due to the concentration of nutrients in a smaller volume and has improved soil fertility through fertilizer irrigation.

Keywords: pig complex, technology, manure, flocculation, rectification, total nitrogen, organic fertilizers

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

Acknowledgements: The authors would like to thank the reviewers for their help in improving the manuscript.

For citation: Shalavina E.V., Vasilev E.V., Papushin E.A. Analysis of Manure Separation Technology Efficiency into Fractions Followed by Liquid Fraction Rectification. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):237–255. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.237-255>

Введение

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденная Президентом России, «устанавливает принципы, приоритеты, основные направления и меры реализации государственной политики в этой области»¹ на ближайшую и долгосрочную перспективу. В ней сформулированы большие вызовы для общества, государства и науки, в числе которых «потребность в обеспечении продовольственной безопасности и продовольственной независимости России, конкурентоспособности отечественной продукции на мировых рынках продовольствия, снижение технологических рисков в агропромышленном комплексе»², а также поддержание экологической безопасности. Для реализации Стратегии формируется соответствующее законодательство, внесены поправки в нормативные акты³, регулирующие переход на наилучшие доступные технологии, приняты соответствующие законы⁴.

Ставится задача перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, а также высокопродуктивному и экологически

чистому агропроизводству. Данную задачу в рамках фундаментальных и поисковых научных исследований по механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства необходимо решать, в том числе путем разработки экологически безопасных машинных технологий.

В настоящее время сохраняется тенденция к увеличению производственной мощности животноводческих предприятий, особенно свиноводческих комплексов, на которых образуются значительные объемы жидкого навоза. Свиноводство оказывает существенное воздействие на агроэкосистему и выдвигает ряд серьезных угроз, которые не ограничиваются только территорией фермы, а непосредственно связаны с прилегающими зонами и косвенным образом влияют на экологическое состояние региона в целом.

Свиноводческие комплексы применяют разные интенсивные технологии переработки свиного навоза в органическое удобрение, позволяющие концентрировать питательные вещества в малом объеме. Транспортировка концентрированных органических удобрений становится

¹ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : утв. Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420384257?marker=6580IP> (дата обращения: 28.02.2023).

² Там же.

³ Об охране окружающей среды : федер. закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ : принят Государственной Думой 20 декабря 2001 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 28.02.2023).

⁴ О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон от 14 июля 2022 г. № 248-ФЗ : принят Государственной Думой 28 июня 2022 г. URL: <https://rg.ru/documents/2022/07/19/document-apk.html> (дата обращения: 28.02.2023); Об ограничении выбросов парниковых газов : федер. закон от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ : принят Государственной Думой 1 июня 2021 г. URL: <https://rg.ru/documents/2021/07/07/fz-ob-ograni4enii-vybrosov-parnikovyh-gazov-dok.html> (дата обращения: 28.02.2023).

более рентабельной. Однако здесь необходим точный учет их потока, в частности, азота из навоза в конечный продукт – жидкое органическое удобрение [1–3].

Свиной навоз характеризуется низким содержанием сухого вещества – не более 8–10 %. Поэтому одной из основных технологий его первичной переработки является разделение на жидкую и твердую фракции [4–6]. Наиболее распространено длительное выдерживание жидкой фракции в герметичных хранилищах. Существуют более эффективные и экологически безопасные технологии ее обработки, в частности ректификацией.

По применяемым интенсивным технологиям переработки свиного навоза в органическое удобрение недостаточно данных для точного расчета содержания питательных элементов в конечных продуктах и, соответственно, их доз внесения. Поэтому при таких расчетах применяются усредненные значения содержания питательных веществ⁵. Для получения достоверных численных значений были проведены исследования технологии переработки свиного навоза, включающие подкисление навоза, флокуляцию и его разделение на фракции с помощью декантерной центрифуги, ректификацию жидкой фракции, пассивное компостирование твердой фракции, длительное выдерживание жидкой фракции.

Цель исследования – провести оценку эффективности технологии разделения свиного навоза на фракции с последующей переработкой жидкой фракции методом ректификации. Такие исследования необходимы для объективного учета движения общего азота из свиного навоза в конечные продукты – твердое органическое удобрение, жидкое

концентрированное органическое удобрение и жидкость для удобрительных поливов. Эффективность изучаемой технологии оценивалась по показателю «сохранность азота» – количество азота в одной тонне готового органического удобрения относительно количества азота в исходном навозе.

Обзор литературы

Доступно много различных технологий переработки навоза, от простых и надежных решений в масштабах фермы до технологически продвинутых решений с более сложными цепочками переработки [7; 8]. Одни технологии отработаны и готовы к внедрению, другие – все еще находятся в процессе разработки.

Переработка навоза предполагает использование различных методов и приемов, позволяющих каким-либо образом изменить его количественные и качественные характеристики с целью уменьшения объемов навоза и возможности получения различных конечных продуктов. Это могут быть биологические, химические, физические методы переработки или их комбинации [9–11]. Технологии могут использоваться индивидуально или последовательно одна за другой, создавая различные технологические цепочки. В результате получают различные органические удобрения, оказывающие влияние на почву [12–15].

Ученые из КНР исследовали влияние известковой добавки на изменения органических веществ, удаление антибиотиков и видообразование тяжелых металлов при пассивном компостировании свиного навоза [16]. В результате добавление извести увеличивало пиковую температуру и продлевало термофильный период. Известь улучшила переход органических веществ и ускорила процесс

⁵ Разработка регламентов по обращению с навозом в рамках проекта «ЛУГА-БАЛТ» / А. Ю. Брюханов [и др.] // Экологически безопасное развитие сельских территорий и сохранение водных объектов : сб. науч. трудов междунар. семинаров, проведенных в рамках Российско-Финляндского проекта «Чистые реки – в здоровое Балтийское море» SE 717 в 2013–2015 гг. ; под общ. ред. В. Б. Минина. СПб. : ИАЭП, 2016. С. 60–66.

компостирования. Хлортетрациклин быстрее растворялся с добавлением извести, по сравнению с контролем.

Во Фландрии существует проблема нехватки земельных угодий для внесения всего органического удобрения, получаемого со свиноводческих комплексов. Поэтому основной задачей при обосновании технологий переработки свиного навоза было понижение содержания питательных веществ (азота и фосфора) в органическом удобрении, вносимом на собственные земельные угодья с концентрацией питательных веществ в органическом удобрении, транспортируемом в другие регионы [17]. В соответствии с обоснованной технологией жидкий свиной навоз изначально разделялся на фракции. Жидкая фракция подавалась на блок биологической очистки в соответствии с полупериодическим процессом нитрификации-денитрификации, после которого направлялась на блок испарения и конденсации. Очищенная жидкость использовалась на земельных угодьях сельскохозяйственного назначения, концентрированное органическое удобрение транспортировалось в соседние регионы, где в нем была потребность.

В Нидерландах свиной навоз также перерабатывали в фосфорное удобрение для экспорта в соседние регионы [18]. При переработке применяли метод подкисления. В Дании проведены исследования по добавлению различных типов флокулянтов в навоз перед разделением его на фракции [19]. Их целью являлось максимальное выделение фосфора из навоза. Было установлено, что при оптимальной флокуляции удаляется 95 % фосфора.

Актуальность имеют технологические линии по переработке навоза с помощью микробной обработки [20]. Контролируемые режимы и параметры процесса брожения формируют качественный, экологически чистый, готовый к использованию продукт. Также возможно получение из навоза жидкофазного биопрепарата

с высоким уровнем биогенности – общее микробное число не менее 1×10^{10} КОЕ/мл.

Ученые из Испании, Финляндии, Колумбии, Китая, Италии и других стран занимаются решением проблемы уменьшения эмиссий при переработке навоза. Так, в Италии проведены исследования выбросов аммиака в процессе переработки навоза в реакторе в зависимости от продолжительности переработки [21]. В результате обнаружено, что увеличение времени переработки приводит к росту эмиссий и повышению капитальных и эксплуатационных затрат. Также проанализированы технологические решения по очистке воздуха при переработке жидкого навоза (скрубберы, биофльтрация, биоскрубберы) и доказано, что наиболее используемой технологией является биофльтрация воздуха [22].

В Финляндии были изучены возможности модернизации технологий переработки навоза с целью повышения транспортабельности органического удобрения [23]. Для этого необходимы технологические решения, уменьшающие массу навоза и позволяющие повысить концентрацию питательных веществ. В результате получено концентрированное органическое удобрение, которое транспортировалось на дальние расстояния. В свою очередь, в Колумбии проведены исследования по эмиссиям питательных веществ для четырех технологий переработки жидкого навоза, в том числе разделения его на твердую и жидкую фракции, метановое сбраживание и длительное выдерживание [24]. Результаты показали, что при внедрении любой из этих технологий выбросы меньше, чем при базовой технологии – пассивном компостировании.

Китайские исследователи при изучении технологии разделения жидкого навоза на фракции с последующим компостированием твердой фракции и анаэробной переработкой жидкой фракции обосновали новую конструкцию биогазовой

установки [25]. Бразильские ученые с помощью эксперимента по переработке жидкой фракции навоза в аэробных прудах определили, что для получения чистого продукта (жидкого органического удобрения), пригодного для внесения на земельные угодья, достаточно 46 дней [26].

В Нидерландах жидкий навоз разделяли на фракции, применяя мембраны с последующим анаэробным сбраживанием жидкой фракции и сжиганием твердой фракции, и получали полезные продукты: биогаз от анаэробного сбраживания для производства энергии, электричество от сжигания твердой фракции с использованием нагретого пара в турбине и жидкое органическое удобрение [27].

Во Франции были проведены исследования по используемости различных технологий переработки навоза (с 2008 по 2016 г.) [28]. Наиболее распространенными технологиями переработки являются пассивное компостирование (61,7 %), аэробная (21,0 %) и анаэробная (7,3 %) переработки. Исследователями предложено создание платформ для коллективной переработки навоза различными технологиями в сочетании с процессом извлечения азота для производства органических добавок и удобрений в удобной для продажи и транспортировки форме.

В Италии рассматривали применение переработанного навоза в качестве биопрепарата с целью поддержания и повышения плодородия почвы [29]. Ферментативный анализ показал его биоактивный потенциал в контексте круговорота питательных веществ и поддержания плодородия.

В 2020 г. исследования в Польше были направлены на изучение влияния различных типов удобрений, полученных в результате переработки навоза – твердое органическое удобрение после компостирования, зола от сжигания, эффлюент после метанового сбраживания, материал после пиролиза, на почву, минерализацию и оптимальное соотношение

C:N:P для минимизации потерь питательных веществ [30]. В результате установлено, что оптимальное соотношение для нормализации процессов в почве должно быть 100-10-1. Для этого необходимо смешивать навоз перед переработкой с дополнительными компонентами, содержащими углерод. Однако даже при оптимальном применении удобрений их использование на одних и тех же полях может продолжаться не более двух лет подряд. Рекомендовано вносить органическое удобрение на основе навоза на одни и те же почвы 1 раз в 4 года.

В США в 2020 г. обобщили результаты многолетних исследований о влиянии различных видов переработанного навоза и помета на плодородие почв, физические свойства почвы (объемную плотность, инфильтрацию, водоудерживающую способность), биологию почвы и урожайность различных зерновых культур в различных системах земледелия [31]. Было подтверждено, что влияние органического удобрения на почву зависит от физических и химических свойств самого навоза и помета, применяемых технологических и управленческих решений по переработке навоза и помета в органическое удобрение, состояния окружающей среды, включая норму и время внесения, тип почвы и климат. В результате выявлено, что правильное применение органических удобрений способствует созданию устойчивой экосистемы, обеспечивающей такое понятие, как «здоровая почва».

Предметом исследований в Испании в 2021 г. было влияние вносимого органического удобрения на биоразнообразие почвы [32]. Сделан вывод, что для биоразнообразия почвы качественные характеристики органического удобрения намного важнее количественных.

Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что значительная часть исследований нацелена на увеличение концентрации питательных

веществ в меньших объемах органических удобрений для сокращения транспортных издержек. Ученые в разных странах подтвердили, что в зависимости от технологий переработки навоза получаются органические удобрения с различными регенеративными свойствами и химическим составом, воздействующие на сообщество почвенных бактерий и грибов, создание стабильной почвенной среды, улучшение питательного статуса почвы.

Материалы и методы

Для исследования выбран типовой свиноводческий комплекс, на котором изначально использовалась технология переработки свиного навоза в органическое удобрение методом длительного выдерживания в герметичных лагунах с мембранным покрытием – «Технология до модернизации». Ее применение приводило к следующим негативным последствиям: заиливанию лагун и нехватке земельных угодий сельскохозяйственного назначения в рентабельном радиусе транспортировки. Решением первой проблемы было более частое перемешивание навоза, приводящее к увеличению эмиссий в атмосферный воздух. Вторая проблема приводила к затратам на транспортировку жидкого органического удобрения к месту внесения до 200 руб. на 1 т жидкого органического удобрения.

Чтобы избежать этих последствий в свиноводческом комплексе, заменили существующую технологию на технологию переработки свиного навоза: подкисление, флокуляция и разделение навоза на фракции в декантерной центрифуге, ректификация жидкой фракции, пассивное компостирование твердой фракции, длительное выдерживание жидкой фракции.

Технология позволяет получать три вида конечных продуктов: твердое органическое удобрение (ТОУ), полученное методом пассивного компостирования; концентрированную жидкость (аммиачную воду), полученную методом

ректификации; жидкость для удобрительных поливов, полученную путем длительного выдерживания.

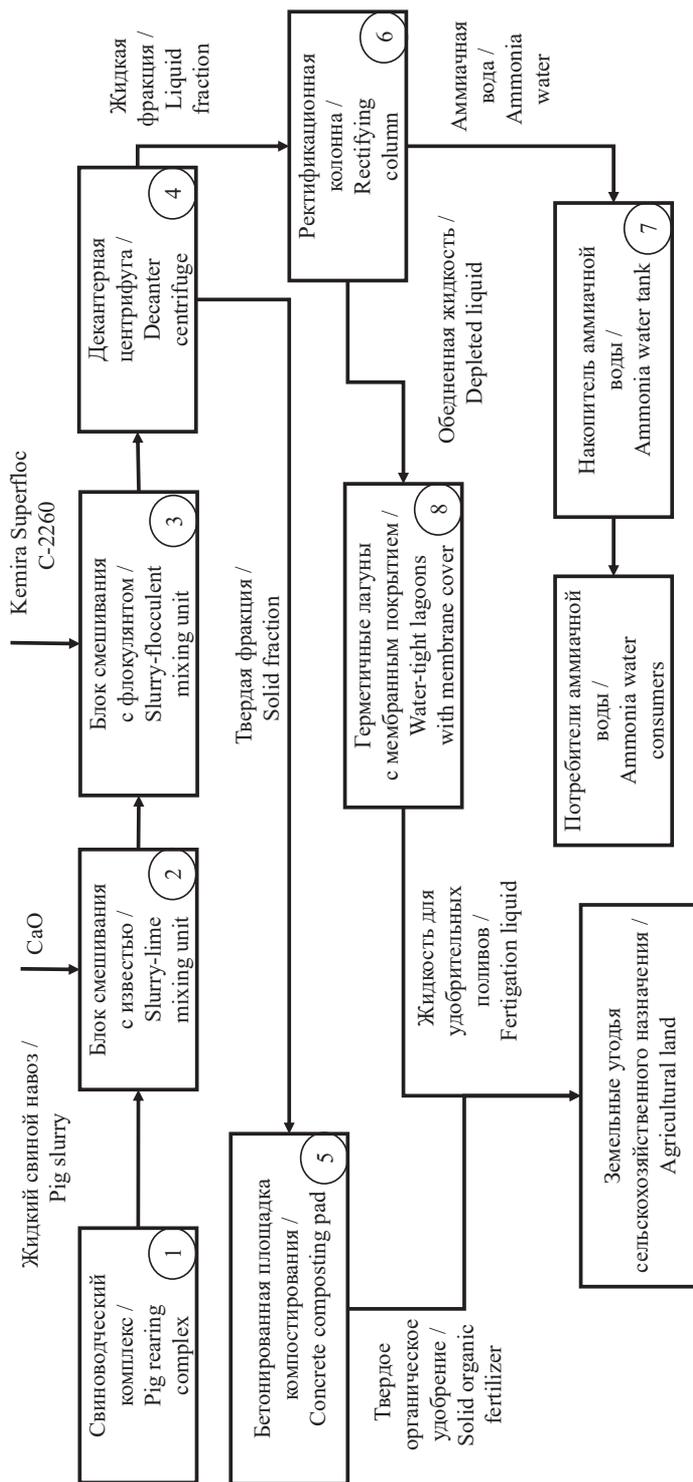
Блок-схема «Технологии после модернизации» переработки свиного навоза в конечные продукты представлена на рисунке 1.

В соответствии с рисунком 1, после навозоприемника, расположенного на свиноводческом комплексе (Блок 1), жидкий навоз насосом по трубопроводу перекачивается в предварительный бак объемом 4 м³ (Блок 2), в котором происходит смешивание жидкого навоза с негашеной известью (СаО) при помощи погружного миксера-гомогенизатора.

Во время смешивания негашеной извести с жидким навозом начинается реакция гашения извести, сопровождаемая обильным выделением тепла. Негашеная известь дозируется из буферной емкости.

Дозировка негашеной извести СаО производится автоматически, ее объемная доля определяется оператором на основании проведенных экспресс анализов рН жидкого навоза. Дозировка негашеной извести необходима для того, чтобы жидкий навоз стал высокощелочной средой. Растворенный в жидком навозе аммонийный азот в нормальной среде (рН < 10) представлен как соединение NH₄ и является нелетучим соединением, а в среде высоко-щелочной (рН > 10) переходит в состояние NH₃ – это соединение более летучее и имеет более низкую температуру кипения, поэтому его можно выделить в ректификационной установке (колонне).

Предварительно смешанный жидкий навоз и негашеная известь с помощью измельчающего насоса загружаются в блок смешивания с флокулянт (Блок 3), в котором осуществляется подмешивание полиэлектролита (флокулянт – Kemira Superfloc C-496 – катионный полиакриламид), выбранного в соответствии с типом и характеристиками свиного навоза с целью оптимизации процесса разделения навоза на фракции.



Р и с. 1. Блок-схема исследуемой технологии
 Fig. 1. Block diagram of the technology under investigation

Жидкий навоз в смеси с негашеной известью и флокулянтами насосами перекачивается в декантерную центрифугу (Блок 4). Попадая в декантерную центрифугу, жидкий навоз под действием центробежных сил осветляется, твердые частицы выпадают в осадок. Твердая фракция жидкого навоза перемещается с помощью винтовых конвейеров в мобильный транспорт и транспортируется на бетонированную площадку компостирования (Блок 5). Твердое органическое удобрение, полученное методом пассивного компостирования, вносится на земельные угодья сельскохозяйственного назначения соседних растениеводческих предприятий.

Жидкая фракция свиного навоза после декантерной центрифуги через один из теплообменных аппаратов «вода – вода» подается в верхнюю часть нижней камеры ректификационной колонны (Блок 6). В противоположном направлении через теплообменные аппараты с помощью центробежного насоса из нижней части ректификационной установки прокачивается уже обедненная жидкая фракция свиного навоза, которая охлаждается, проходя через теплообменник, отдавая избыточную теплоту поступающей жидкой фракции свиного навоза после декантерной центрифуги.

Протекая через массообменные элементы ректификационной колонны, жидкая фракция свиного навоза нагревается. В процессе нагрева аммонийный азот, растворенный в жидкой фракции свиного навоза, имея более низкую температуру кипения, начинает испаряться. Жидкая фракция свиного навоза, из которой испарился аммонийный азот, используется для нагрева исходной жидкой фракции свиного навоза, поступающей с декантерной центрифуги через теплообменник.

Пары аммонийного азота конденсируются в теплообменном аппарате. Для процесса конденсации используется

химически подготовленная пресная вода, находящаяся в отдельном баке. В результате образуется жидкое концентрированное органическое удобрение (аммиачная вода), которое откачивается в герметичный накопитель (Блок 7). Жидкое концентрированное органическое удобрение (ЖКОУ) передается другим юридическим лицам.

Обедненная жидкая фракция свиного навоза после ректификационной колонны насосом перекачивается в герметичные лагуны с пленочным покрытием (Блок 8). Полученное жидкое органическое удобрение (ЖОУ) используется для удобрительных поливов.

В рамках исследований рассчитаны количественные и качественные характеристики свиного навоза, его твердой и жидкой фракции, ЖКОУ и ЖОУ.

Расчет количественных и качественных характеристик свиного навоза осуществлялся методом баланса массы⁶. Фактическая масса навоза определялась с помощью приборов учета, установленных в навозоприемнике на свиноводческом комплексе. Фактические качественные характеристики навоза (влажность, общий азот) определялись экспериментальным путем. Отбирались пробы жидкого навоза из навозоприемника, расположенного на свиноводческом комплексе. В пробе определялась влажность материала в соответствии с ГОСТ 26713-85 «Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка» и общий азот в соответствии с ГОСТ 26715-85 «Удобрения органические. Методы определения общего азота». Полученные расчетные и фактические данные сопоставлялись для подтверждения корректности расчета.

Расчет количественных и качественных характеристик твердой и жидкой фракции свиного навоза осуществлялся по ранее разработанной методике [33]. Фактические качественные характеристики твердой и жидкой фракций навоза

⁶ Overview of Calculation Methods for the Quantity and Composition of Livestock Manure in the Baltic Sea region / A. Kaasik [et al.]. 2019. URL: https://www.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2019/06/WP3-report_ManureStandards_Final2.pdf (дата обращения: 28.02.2023).

(влажность, общий азот) определялись экспериментальным путем. Отбирались пробы твердой и жидкой фракций навоза после декантерной центрифуги. В пробах определялась влажность материала и общий азот. Полученные расчетные и фактические данные сопоставлялись для подтверждения корректности расчета.

Расчет количественных и качественных характеристик аммиачной воды и обедненной жидкости осуществлялся в соответствии с источниками⁷ [34; 35]. Фактические качественные характеристики аммиачной воды и обедненной жидкости (влажность, общий азот) определялись экспериментальным путем. Отбирались пробы аммиачной воды и обедненной жидкости после ректификационной колонны. В пробах определялась влажность материала и общий азот. Полученные расчетные и фактические данные сопоставлялись для подтверждения корректности расчета.

Экспериментальные исследования были проведены на пилотном свиноводческом комплексе; анализы проб выполнены в аналитической лаборатории ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2022 г. Пробы отбирались с трехкратной повторностью. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе Excel.

Результаты исследования

Выборный для исследований свиноводческий комплекс рассчитан на содержание 6 700 свиноматок и производство 180 тыс. откормочных свиней в год (рис. 2).

Содержание животных – бесподстилочное на частично щелевых полах. Навоз самотеком поступает в навозоприемник, расположенный на свиноводческом комплексе. Площадки для переработки свиного навоза в органическое удобрение представлены на рисунке 3.



Р и с. 2. Внешний вид свиноводческого комплекса
F i g. 2. View of the pig breeding complex



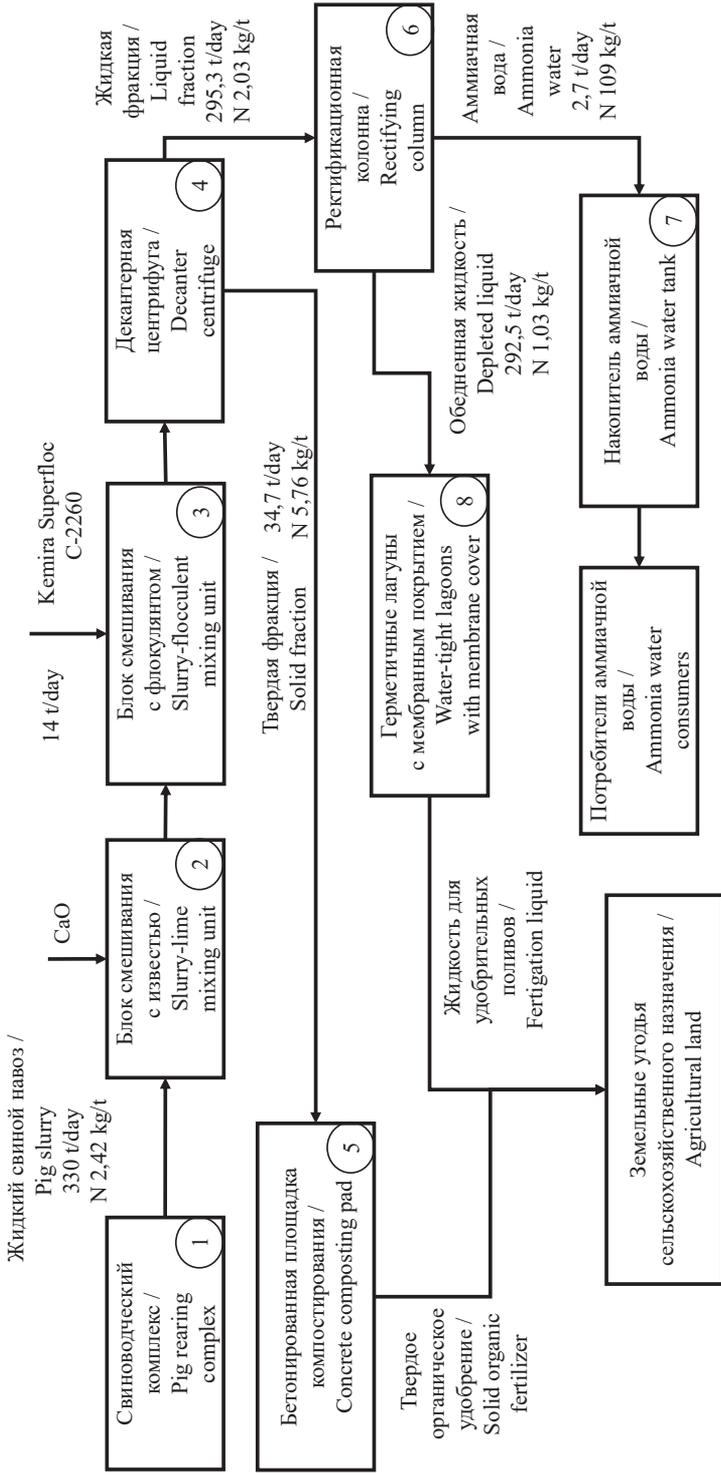
Р и с. 3. Площадка для переработки свиного навоза в органическое удобрение – герметичные лагуны с мембранным покрытием для обедненной фракции после ректификации
F i g. 3. Facilities for processing pig manure into organic fertilizers – water-tight lagoons with membrane cover for the depleted liquid fraction after rectification

Количественные и качественные характеристики свиного навоза, его твердой и жидкой фракции, а также конечных продуктов представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, различие между расчетными и фактическими значениями не превышает 10,2 %, что говорит о достоверности расчетов.

Балансовая схема потоков массы компонентов и массы общего азота в компонентах представлена на рисунке 4.

⁷ Лаптев А. Г., Коначин А. М., Минеев Н. Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей : учеб. пособие. Казань : Казанский гос. энерг. ун-т, 2007. 426 с. URL: https://ingehim.ru/images/Laptev_Konakhin_Mineev_2007_Theoretical_fundamentals_and_calculation_of_apparatuses_of_separation_of_homogeneous_mixtures.pdf (дата обращения: 28.02.2023).



Р и с. 4. Балансовая схема потоков массы компонентов и массы общего азота в компонентах свиного навоза
 Fig. 4. Balance diagram of component mass flows and of total nitrogen mass in pig manure components

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

**Количественные и качественные характеристики свиного навоза
и полученных из него продуктов**
Quantity and quality of pig manure and the end-products

Показатель / Indicator	Расчетные значения / Calculated values	Фактические значения / Actual values	Различие / Difference, %
Масса навоза, т/сут / Mass of manure, t/day	302	330	8,48
Влажность навоза, % / Moisture content of manure, %	96,9	98,2	1,3
Масса общего азота в навозе, т/сут / Mass of total nitrogen, t/day	0,76	0,79	3,8
Масса твердой фракции навоза, т/сут / Mass of solid fraction, t/day	36,8	34,7	6,1
Влажность твердой фракции навоза, % / Moisture content of solid fraction, %	73,4	71,2	3,1
Масса общего азота в твердой фракции навоза, т/сут / Mass of total nitrogen in solid fraction, t/day	0,21	0,20	5
Масса жидкой фракции навоза, т/сут / Mass of liquid fraction, t/day	265,2	295,3	10,2
Влажность жидкой фракции навоза, % / Moisture content of liquid fraction, %	98,6	99,1	0,5
Масса общего азота в жидкой фракции навоза, т/сут / Mass of total nitrogen in liquid fraction, t/day	0,55	0,59	6,8
Масса обедненной жидкости, т/сут / Mass of depleted liquid, t/day	284,4	292,5	2,8
Влажность обедненной жидкости, % / Moisture content of depleted liquid, %	99,8	99,4	0,4
Масса общего азота в обедненной жидкости, т/сут / Mass of total nitrogen in depleted liquid, t/day	0,28	0,3	7,1
Масса аммиачной воды, т/сут / Mass of ammonia water, t/day	2,6	2,7	5,1
Влажность аммиачной воды, % / Moisture of ammonia water, %	99,5	99,9	0,4
Масса общего азота в аммиачной воде, т/сут / Mass of total nitrogen in ammonia water, t/day	0,27	0,29	6,9

Обработка результатов экспериментальных исследований представлена в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, средние значения попадают в интервалы среднеквадратичных отклонений, следовательно, данные достоверны, сомнительные точки отсутствуют.

В результате переработки свиного навоза на свиноводческом комплексе образуются конечные продукты, готовые к использованию. Все конечные продукты соответствуют ГОСТ Р 53117-2008

«Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия»:

– твердое органическое удобрение, полученное методом пассивного компостирования твердой фракции свиного навоза после декантерной центрифуги. За год образуется 10 150 т ТОУ с содержанием азота 54,7 т (5,4 кг азота на 1 т ТОУ). Доза внесения ТОУ под зерновые культуры составляет 33,4 т/га. Оно вносится на земельные угодья сельскохозяйственного назначения;

Обработка результатов экспериментальных исследований
Experimental results analysis

Показатель содержания общего азота / Indicator of nitrogen content	1-я повторность / 1 st replication	2-я повторность / 2 nd replication	3-я повторность / 3 rd replication	Среднее значение / Average	Верхняя граница средних квадратичных отклонений / Upper limit of standard deviations $\bar{x} + \sigma$	Нижняя граница средних квадратичных отклонений / Lower limit of standard deviations $\bar{x} - \sigma$
в свином навозе, кг/т / in pig manure, kg/t	2,44	2,40	2,43	2,42	2,44	2,40
в твердой фракции свиного навоза, кг/т / in the solid fraction of pig manure, kg/t	5,78	5,77	5,74	5,76	5,78	5,74
в жидкой фракции свиного навоза, кг/т / in the liquid fraction of pig manure, kg/t	2,04	2,04	2,02	2,03	2,04	2,02
в обедненной жидкости, кг/т / in the depleted liquid, kg/t	1,02	1,03	1,04	1,03	1,04	1,02
в аммиачной воде, кг/т / in the ammonia water, kg/t	108,00	110,00	109,00	109,00	109,82	108,18

Примечания: \bar{x} – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение.

Notes: \bar{x} – the mean value; σ – the root from variance.

– жидкое концентрированное органическое удобрение (аммиачная вода), полученное методом ректификации. За год образуется 1 000 т ЖКОУ с содержанием азота 107,9 т (107,9 кг азота на 1 т ЖКОУ). Доза внесения ЖКОУ под зерновые культуры составляет 1,7 т/га. ЖКОУ передается другим юридическим лицам;

– жидкость для удобрительных поливов, полученная методом длительного выдерживания. За год образуется 105 700 т удобрительной жидкости с содержанием азота 98,9 т (0,93 кг на 1 т (0,93 г/дм³). В соответствии с пунктом 6.10.10 СП 100.13330 «Мелиоративные системы и сооружения» концентрация общего азота в поливной воде при использовании стоков должна устанавливаться в зависимости от климатических

условий и состава возделываемых культур и не должна превышать 1,5 г/дм³ – для многолетних злаковых трав второго и последующих лет произрастания; 1,0 г/дм³ – для многолетних злаковых трав спустя два месяца после всходов, а также для люцерны, клевера, смеси однолетних трав без бобовых компонентов. На свиноводческом комплексе жидкость для удобрительных поливов используется на собственных земельных участках. В соответствии с ГОСТ Р 53117-2008 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия», поступление общего азота с удобрением не должно превышать 320 кг/га в год.

Обсуждение и заключение

В исследовании были рассмотрены преимущества и недостатки технологий до и после модернизации.

Были рассчитаны количественные и качественные характеристики свиного навоза и полученных из него конечных продуктов. Различие между расчетными и фактическими значениями не превышает 10,2 %, что говорит о достоверности расчетов.

Применение расчетного метода позволяет определить эффективность использования питательных веществ в органическом удобрении, полученном на основе свиного навоза.

Внедрение на свиноводческом комплексе технологического решения по разделению навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции (Технология после модернизации) дало следующие положительные результаты:

1. Исключение крупных твердых частиц из навоза, поступающего в навозохранилище, позволяет избежать заиливания лагун.

2. Получаемое ТОУ используется на земельных участках сельскохозяйственного назначения для повышения плодородия почв с учетом возделываемых культур.

3. Концентрация питательных веществ в ЖКОУ позволяет уменьшить массу транспортируемого органического удобрения, что приводит к снижению транспортных затрат при передаче ЖКОУ другим юридическим лицам. При этом качество удобрения не ухудшается.

4. Полученное концентрированное органическое удобрение передается другим юридическим лицам для повышения плодородия почв и получения запланированного урожая. Доза внесения рассчитана на примере озимого рапса и составляет 1,3 т/га.

5. Полученная жидкость для удобрительных поливов вносится на близлежащие собственные земельные участки с использованием шланговой системы, тем самым снижаются эксплуатационные затраты.

6. Внедрение на предприятии Технологии после модернизации позволило в целом сократить капитальные затраты в 1,2 раза, а удельные эксплуатационные – в 5,6 раз.

Внедрение на свиноводческом комплексе технологических решений согласно Технологии после модернизации, которая включала подкисление навоза, флокуляцию, разделение навоза на фракции в декантерной центрифуге, компостирование твердой фракции и ректификацию жидкой фракции, позволило снизить эмиссии в атмосферу на 10 % за счет сохранности азота, сократить эксплуатационные затраты на транспортировку органического удобрения на 47 % за счет концентрации питательных веществ в меньшем объеме и повысить плодородие почв за счет удобрительных поливов.

Согласно закону «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», свиной навоз является побочным продуктом животноводства, если соблюдаются «Требования к обращению побочных продуктов животноводства», утвержденные Постановлением правительства РФ от 31.10.2022 № 1940. Функционирование Технологии после модернизации не противоречит Постановлению правительства РФ от 31.10.2022 г. № 1940 и позволяет вести более точный учет объемов образования и использования переработанных побочных продуктов животноводства, что необходимо при заполнении Формы уведомления по побочным продуктам животноводства, утвержденной Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 07.10.2022 г. № 671 «Об утверждении порядка, сроков и формы направления уведомления об отнесении веществ, образуемых при содержании сельскохозяйственных животных, к побочным продуктам животноводства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трифанов А. В., Калюга В. В., Базыкин В. И. Состояние и тенденции развития производства свинины в Российской Федерации // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 90. С. 5–14. EDN: XELLCX
2. Васильев Э. В., Шалавина Е. В. Изменение содержания азота и фосфора в жидкой фракции свиного навоза при биологической очистке // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 146–150. EDN: SYDQQR
3. Welfare Health and Productivity in Commercial Pig Herds / P. Racewicz [et al.] // Animals. 2021. Vol. 11, issue 4. Article no. 1176. <https://doi.org/10.3390/ani11041176>
4. Kariyama I. D., Zhai X., Wu B. Physical and Rheological Properties of Animal Manure: A Review // Transactions of the ASABE. 2018. Vol. 61, no. 3. P. 1113–1120. <https://doi.org/10.13031/trans.12768>
5. Pilot-Scale Demonstration of Membrane-Based Nitrogen Recovery from Swine Manure / B. Molinuevo-Salces [et al.] // Membranes. 2020. Vol. 10, no. 10. Article 270. <https://doi.org/10.3390/membranes10100270>
6. Environmental Impacts of Combining Pig Slurry Acidification and Separation under Different Regulatory Regimes – A Life Cycle Assessment / M. ten Hoeve [et al.] // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 181. P. 710–720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.028>
7. Precision Fermentation to Advance Fungal Food Fermentations / K. F. Chai [et al.] // Current Opinion in Food Science. 2022. Vol. 47. Article no. 100881. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>
8. Fomicheva N. V. The Effect of the Ratio of Peat and Manure on the Efficiency of the Fermentation Process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1076. Article no. 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012042>
9. Mixed Acid Fermentation of Carbohydrate-Rich Dairy Manure Hydrolysate / A. T. Ingle [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.724304>
10. Composting of Mixture of Total Mixed Ration and Cow Manure: Quality of the Finished Compost / X. Bai [et al.] // Advanced Composites and Hybrid Materials. 2022. Vol. 5. P. 294–306. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00365-3>
11. Tóth F. A., Tamás J., Nagy P. T. Early Evaluation of Use of Fermented Chicken Manure Products in Practice of Apple Nutrient Management // Acta Agraria Debreceniensis. 2022. Vol. 1. P. 195–198. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/8502>
12. Gross A., Glaser B. Meta-Analysis on How Manure Application Changes Soil Organic Carbon Storage // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article no. 5516. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82739-7>
13. Cow Manure Application Effectively Regulates the Soil Bacterial Community in Tea Plantation / S. Zhang [et al.] // BMC Microbiology. 2020. Vol. 20. Article no. 190. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01871-y>
14. Effects of Short-Term Manure Nitrogen Input on Soil Microbial Community Structure and Diversity in a Double-Cropping Paddy Field of Southern China / H. Tang [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Article no. 13540. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70612-y>
15. Antonious G. F., Turley E. T., Dawood M. H. Monitoring Soil Enzymes Activity Before and After Animal Manure Application // Agriculture. 2020. Vol. 10, no. 5. Article no. 166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
16. Effects of Lime Amendment on the Organic Substances Changes, Antibiotics Removal, and Heavy Metals Speciation Transformation during Swine Manure Composting / Z. Chen [et al.] // Chemosphere. 2021. Vol. 262. Article no. 128342. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128342>
17. Manure Treatment According to the Trevi-Concept / E. Smet [et al.] // Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences. 2003. Vol. 68, issue 2, part A. P. 125–131. URL: https://www.researchgate.net/publication/8415127_Manure_treatment_according_to_the_Trevi-concept (дата обращения: 28.02.2023).
18. Phosphorus Recovery from Co-Digested Pig Slurry: Development of the RePeat Process / I. Regelink [et al.]. Wageningen : Wageningen Environmental Research. Report 2949, 2019. 66 p. <https://doi.org/10.18174/476731>

19. Hjorth M., Christensen M. L., Christensen P. V. Flocculation, Coagulation, and Precipitation of Manure Affecting Three Separation Techniques // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 18. P. 8598–8604. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.009>
20. Fomicheva N. V., Rabinovich G. Yu. Technological Line for Processing Animal Waste // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. Article no. 052004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052004>
21. Nitrogen Recovery from Different Livestock Slurries with an Innovative Stripping Process / A. Heidarzadeh Vazifekhoran [et al.] // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article no. 7709. <https://doi.org/10.3390/su14137709>
22. Trends on Manure Processing in Europe / X. Flotats [et al.] // *Book of Proceedings, 2nd International Conference of WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*. Braga (Portugal), 11–13 September. Edition: CVR, Centro para a Valorizaçao de Residuos, 2013. P. 587–592.
23. Manure Processing as a Pathway to Enhanced Nutrient Recycling: Report of SuMaNu Platform / S. Luostarinen [et al.] // *Natural Resources and bioeconomy studies 62/2020*. Helsinki : Natural Resources Institute Finland. 2020. 76 p. URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/08/Manure-processing-as-a-pathway-to-enhanced-nutrient-recycling.pdf> (дата обращения: 28.02.2023).
24. Aguirre-Villegas H. A., Larson R., Reinemann D. J. From Waste-to-Worth: Energy, Emissions, and Nutrient Implications of Manure Processing Pathways // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2014. Vol. 8, issue 6. P. 770–793. <https://doi.org/10.1002/bbb.1496>
25. Manure Treatment and Recycling Technologies / R. Dong [et al.] // *Circular Economy and Sustainability / A. Stefanakis, I. Nikolaou (eds.)*. Vol. 2. Environmental Engineering. Elsevier, 2022. P. 161–180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00009-1>
26. Knaut T. F., Schumacher Teixeira P. Impact of Embiofert Treatment in Swine Manure Treatment Ponds // *Journal of Engineering Research*. 2022. Vol. 2, no. 9. P. 1–10. <https://doi.org/10.22533/at.ed.317292207061>
27. Melse R. W., De Buissonjé F. E. Manure Treatment and Utilisation Options. Wageningen: Wageningen Livestock Research, 2020. 7 p. URL: <https://edepot.wur.nl/541798> (дата обращения: 28.02.2023).
28. Loyon L. Overview of Manure Treatment in France // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 516–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.040>
29. Microbiological Features and Bioactivity of a Fermented Manure Product (Preparation 500) Used in Biodynamic Agriculture / M. Giannattasio [et al.] // *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2013. Vol. 23, no. 5. P. 644–651. <https://doi.org/10.4014/jmb.1212.12004>
30. Management of Poultry Manure in Poland – Current State and Future Perspectives / D. Drózdź [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 264. Article no. 110327. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327>
31. Rayne N., Aula L. Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review // *Soil Systems*. 2020. Vol. 4, issue 4. Article no. 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040064>
32. Manure Management and Soil Biodiversity: Towards More Sustainable Food Systems in the EU / J. D. Köninger [et al.] // *Agricultural Systems*. 2021. Vol. 194. Article no. 103251. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103251>
33. Шалавина Е. В., Уваров Е. В., Васильев Е. В. Методика расчета распределения общего азота и общего фосфора между фракциями свиного навоза // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32, № 1. С. 54–70. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070>
34. Розен А. М. Производство тяжелой воды методом ректификации аммиака с тепловым насосом. Опыт пуска промышленной установки // *Атомная энергия*. 1995. Т. 5. С. 221–229. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t79-3_1995/go,68/ (дата обращения: 28.02.2023).
35. Максешко Л. М. Экобезопасная технология переработки навозных отходов животноводства с абсорбцией парниковых газов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 1. С. 205–209. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-205-209>

Поступила 02.03.2023; одобрена после рецензирования 02.04.2023; принята к публикации 12.04.2023

Об авторах:

Шалавина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, shalavinaev@mail.ru

Васильев Эдуард Вадимович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, sznii6@yandex.ru

Папушин Эдуард Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7035-4654>, papushinea@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. В. Шалавина – разработка методики; проведение расчетов; отбор проб; сравнение результатов.

Э. В. Васильев – постановка задачи; разработка методики.

Э. А. Папушин – формирование структуры статьи; анализ литературных источников по изучаемой проблематике.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Trifanov A.V., Kalyuga V.V., Bazykin V.I. [Current State and Trends of Pork Production in the Russian Federation]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016;(90):5–14. (In Russ.) EDN: XELLCX
2. Vasilev E.V., Shalavina E.V. [Change in Nitrogen and Phosphorus Content during Biological Treatment of Liquid Fraction of Pig Manure]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2014;(85):146–150. (In Russ.) EDN: SYDQQR
3. Racewicz P., Ludwiczak A., Skrzypczak E., et al. Welfare Health and Productivity in Commercial Pig Herds. *Animals*. 2021;11(4):1176. <https://doi.org/10.3390/ani11041176>
4. Kariyama I.D., Zhai X., Wu B. Physical and Rheological Properties of Animal Manure: A Review. *Transactions of the ASABE*. 2018;61(3):1113–1120. <https://doi.org/10.13031/trans.12768>
5. Molinuevo-Salces B., Riaño B., Vanotti M.B., Hernández-González D. Pilot-Scale Demonstration of Membrane-Based Nitrogen Recovery From Swine Manure. *Membranes*. 2020;10(10):270. <https://doi.org/10.3390/membranes10100270>
6. Ten Hoeve M., Gómez-Muñoz B., Jensen L.S., Bruun S. Environmental Impacts of Combining Pig Slurry Acidification and Separation Under Different Regulatory Regimes – A Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*. 2016;181:710–720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.028>
7. Chai K.F., Ng K.R., Samarasinghe M., Chen W.N. Precision Fermentation to Advance Fungal Food Fermentations. *Current Opinion in Food Science*. 2022;47:100881. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>
8. Fomicheva N.V. The Effect of the Ratio of Peat and Manure on the Efficiency of the Fermentation Process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1076:012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012042>
9. Ingle A.T., Fortney N.W., Walters K.A., Donohue T.J., Noguera D.R. Mixed Acid Fermentation of Carbohydrate-Rich Dairy Manure Hydrolysate. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021;9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.724304>

10. Bai X., Liu J., Fu H., et al. Composting of Mixture of Total Mixed Ration and Cow Manure: Quality of the Finished Compost. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022;5:294–306 <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00365-3>
11. Tóth F.A., Tamás J., Nagy P.T. Early Evaluation of Use of Fermented Chicken Manure Products in Practice of Apple Nutrient Management. *Acta Agraria Debreceniensis*. 2022;(1):195–198. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/8502>
12. Gross A., Glaser B. Meta-Analysis on How Manure Application Changes Soil Organic Carbon Storage. *Scientific Reports*. 2021;11:5516. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82739-7>
13. Zhang S., Sun L., Wang Y., et al. Cow Manure Application Effectively Regulates the Soil Bacterial Community in Tea Plantation. *BMC Microbiology*. 2020;20:190. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01871-y>
14. Tang H., Li C., Xiao X., et al. Effects of Short-Term Manure Nitrogen Input on Soil Microbial Community Structure and Diversity in a Double-Cropping Paddy Field of Southern China. *Scientific Reports*. 2020;10:13540. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70612-y>
15. Antonious G.F., Turley E.T., Dawood M.H. Monitoring Soil Enzymes Activity Before and After Animal Manure Application. *Agriculture*. 2020;10(5):166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
16. Chen Z., Fu Q., Cao Y., Wen Q., Wu Y. Effects of Lime Amendment on the Organic Substances Changes, Antibiotics Removal, and Heavy Metals Speciation Transformation During Swine Manure Composting. *Chemosphere*. 2021;262:128342. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128342>
17. Smet E., Debruyne J., Deckx J., Deboosere S. Manure Treatment According to the Trevi-Concept. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*. 2003;68(2-A):125–131. Available at: https://www.researchgate.net/publication/8415127_Manure_treatment_according_to_the_Trevi-concept (accessed 28.02.2023).
18. Regelink I., Ehlert P., Smit G., Everlo S., Prinsen A., Schoumans O. Phosphorus Recovery from Co-Digested Pig Slurry: Development of the RePeat Process. Wageningen: Wageningen Environmental Research; 2019. <https://doi.org/10.18174/476731>
19. Hjorth M., Christensen M.L., Christensen P.V. Flocculation, Coagulation, and Precipitation of Manure Affecting Three Separation Techniques. *Bioresource Technology*. 2008;99(18):8598–8604. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.009>
20. Fomicheva N.V., Rabinovich G.Yu. Technological Line for Processing Animal Waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;677:052004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052004>
21. Heidarzadeh Vazifekhoran A., Finzi A., Perazzolo F., Riva E., Ferrari O., Provolo G. Nitrogen Recovery from Different Livestock Slurries with an Innovative Stripping Process. *Sustainability*. 2022;14:7709. <https://doi.org/10.3390/su14137709>
22. Flotats X., Bonmati A., Palatsi J., Foged H.L. Trends on Manure Processing in Europe. In: Book of Proceedings, 2nd International Conference of WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities. Braga (Portugal), 11–13 September. Edition: CVR, Centro para a Valorização de Resíduos; 2013. p. 587–592.
23. Luostarinen S., Tampio E., Laakso J., et al. Manure Processing as a Pathway to Enhanced Nutrient Recycling: Report of Sumanu Platform. *Natural Resources and Bioeconomy Studies* 62/2020. Helsinki: Natural Resources Institute Finland; 2020. Available at: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/08/Manure-processing-as-a-pathway-to-enhanced-nutrient-recycling.pdf> (accessed 28.02.2023).
24. Aguirre-Villegas H.A., Larson R., Reinemann D.J. From Waste-To-Worth: Energy, Emissions, and Nutrient Implications of Manure Processing Pathways. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2014;8(6):770–793 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.006>
25. Dong R., Qiao W., Guo J., Sun H. Manure Treatment and Recycling Technologies. In: Stefanakis A., Nikolaou I. (eds.). *Circular Economy and Sustainability*. Vol. 2. Environmental Engineering. Elsevier; 2022. p. 161–180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00009-1>
26. Knaul T.F., Schumacher Teixeira P. Impact of Embiofert Treatment in Swine Manure Treatment Ponds. *Journal of Engineering Research*. 2022;2(9):1–10. <https://doi.org/10.22533/at.ed.317292207061>
27. Melse R.W., De Buissonjé F.E. Manure Treatment and Utilisation Options. Wageningen: Wageningen Livestock Research; 2020. Available at: <https://edepot.wur.nl/541798> (accessed 28.02.2023).

28. Loyon L. Overview of Manure Treatment in France. *Waste Management*. 2017;61:516–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.040>
29. Giannattasio M., Vendramin E., Fornasier F., et al. Microbiological Features and Bioactivity of a Fermented Manure Product (Preparation 500) Used in Biodynamic Agriculture. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2013;23(5):644–651. <https://doi.org/10.4014/jmb.1212.12004>
30. Drózdź D., Wystalska K., Malińska K., Grosser A., Grobelak A., Kacprzak M. Management of Poultry Manure in Poland – Current State and Future Perspectives. *Journal of Environmental Management*. 2020;264:110327. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327>
31. Rayne N., Aula L. Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. *Soil System*. 2020;4(4):64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040064>
32. Köninger J., Lugato E., Panagos P., Kochupillai M., Orgiazzi A., Briones M. J.I. Manure Management and Soil Biodiversity: Towards More Sustainable Food Systems in the EU. *Agricultural Systems*. 2021;194:103251. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103251>
33. Shalavina E.V., Uvarov R.A., Vasilev E.V. Calculation Methods of Total Nitrogen and Total Phosphorus Distribution in Pig Manure Fractions. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):54–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070>
34. Rosen A.M. Heavy Water Production by Ammonia Rectification with Heat Pump. The Experience of Industrial Plant Launching. *Atomnaya energiya*. 1995;(5):221–229. Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t179-3_1995/go,68/ (accessed 28.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
35. Maksishko L.M. Eco-Friendly Technology for the Processing of Livestock Manure Waste with Greenhouse Gas Absorption. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;(1):205–209. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-205-209>

Submitted 02.03.2023; revised 02.04.2023; accepted 12.04.2023

About the authors:

Ekaterina V. Shalavina, Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, shalavinaev@mail.ru

Eduard V. Vasilev, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, sznii6@yandex.ru

Eduard A. Papushin, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7035-4654>, papushinea@yandex.ru

Authors contribution:

E. V. Shalavina – methodology development; calculations; sampling and sample analysis; comparison of results.

E. V. Vasilev – study concept and methodology development.

E. A. Papushin – article structuring; literature review.

All authors have read and approved the final manuscript.



Состав для противокоррозионной обработки деталей резьбовых соединений

А. В. Шемякин¹, И. В. Фадеев^{2✉}, И. А. Успенский¹,
И. А. Юхин¹, М. Н. Чаткин³

¹ Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева (г. Рязань, Российская Федерация)

² Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева (г. Чебоксары, Российская Федерация)

³ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет (г. Саранск, Российская Федерация)

✉ ivan-fadeev-2012@mail.ru

Аннотация

Введение. Обзор исследований по защите резьбовых соединений от коррозии показывает, что в них имеет место негерметичность, способствующая развитию щелевой коррозии, которая приводит к снижению механической прочности деталей резьбовых соединений и усложняет демонтаж. Современные смазочные составы и химические фиксаторы резьбы не обеспечивают защиту от коррозии и демонтаж резьбовых соединений в течение длительного срока эксплуатации, поэтому разработка более эффективного смазочного состава является актуальной задачей.

Цель статьи. Разработка эффективного смазочного состава для защиты от коррозии и улучшения разборности резьбовых соединений.

Материалы и методы. Детали резьбовой пары М10 с шагом резьбы 1,5 мм из стали Ст3, соединяющие два изделия (опытные образцы), смазывали солидолом Ж-СКа 2/6-2, литолом-24, составом солидол + олигомер Д-10ТМ 5% по массе, составом литол-24 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе, затягивали на момент усилия затяжки 80 Н·м, погружали в 3%-й раствор хлорида натрия при температуре 22–24 °С. Через 8 ч образцы извлекали из раствора и оставляли в воздухе на 16 ч, что представлял один цикл. По вариантам смазки количество параллельных опытов было 5. Продолжительности экспонирования – 24, 48, 96, 240, 480, 720 ч, после истечения которых по 5 образцов каждого варианта смазки разбирали, фиксировали значение момента силы раскрепления, оценивали коррозионное поражение и рассчитывали коэффициент трения.

Результаты исследования. Разработан эффективный состав смазки для обработки деталей резьбовых соединений, повышающий их коррозионную стойкость и упрощающий демонтаж.

Обсуждение и заключение. При добавлении олигомера Д-10ТМ 5% по массе в литол-24 наблюдается существенное повышение продолжительности времени до появления очагов коррозии на деталях резьбовых соединений и улучшение их демонтажа. Внедрение полученных результатов позволяет увеличить надежность резьбовых соединений.

© Шемякин А. В., Фадеев И. В., Успенский И. А., Юхин И. А., Чаткин М. Н., 2023



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

Ключевые слова: резьбовое соединение, защита от коррозии, демонтаж, смазка, олигомер Д-10ТМ

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Состав для противокоррозионной обработки деталей резьбовых соединений / А. В. Шемякин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 256–269. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.256-269>

Original article

Composition for Anticorrosive Treatment of Parts of Threaded Connections

A. V. Shemyakin^a, I. V. Fadeev^b, I. A. Uspensky^a,
I. A. Yukhin^a, M. N. Chatkin^c

^a Ryazan State Agrotechnological University
named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

^b Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University
(Cheboksary, Russian Federation)

^c National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)

 ivan-fadeev-2012@mail.ru

Abstract

Introduction. A review of studies on the protection of threaded connections from corrosion shows that they have leaks that contribute to the development of crevice corrosion, which leads to a decrease in the mechanical strength of threaded connections and complicates dismantling. Modern lubricants and chemical thread fixatives do not provide corrosion protection and disassembly of threaded connections over a long service life, so the development of a more effective lubricant composition is an urgent task.

Aim of the Article. Is to develop an effective lubricant composition to protect against corrosion and improve the disassembly of threaded connections.

Materials and Methods. The parts of the M10 threaded pair with a thread pitch of 1.5 mm made of St3 steel, connecting two products, (prototypes) were lubricated with grease Zh-SKa 2/6-2, litol-24, grease + oligomer D-10TM 5% by weight, composition of litol-24 + oligomer D-10TM 5% by weight, tightened to the moment of tightening force 80 N·m, immersed in a 3% hydrochloric acid solution at a temperature of 22–24°C. After 8 hours, the samples were removed from the solution and left in the air for 16 hours, which represented one cycle. According to the lubrication options, the number of parallel experiments was 5. Exposure duration – 24; 48; 96; 240; 480; 720 hours, after the expiration of which 5 samples of each lubricant option were disassembled, the value of the moment of the release force was recorded, the corrosion damage was assessed, and the coefficient of friction was calculated.

Results. An effective lubricant composition has been developed for processing parts of threaded connections, which increases their corrosion resistance and improves dismantling.

Discussion and Conclusion. When adding oligomer D-10TM 5% by weight in litol-24, there is a significant increase in the length of time before the appearance of foci of corrosion on the details of threaded connections and an improvement in their dismantling. Implementation of the obtained results allows to increase the reliability of threaded connections.

Keywords: threaded connection, corrosion protection, dismantling, lubrication, D-10TM oligomer

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

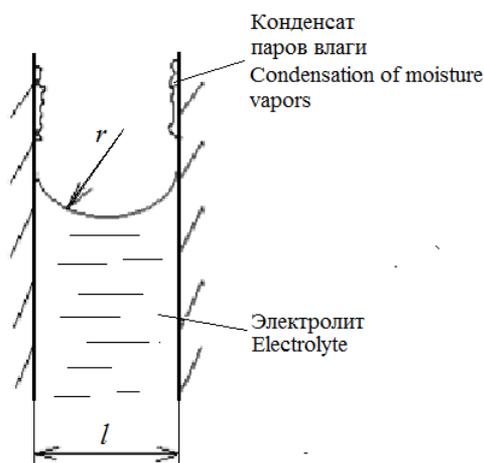
For citation: Shemyakin A.V., Fadeev I.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Chatkin M.N. Composition for Anticorrosive Treatment of Parts of Threaded Connections. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):256–269. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.256-269>

Введение

Конструктивной особенностью современной автотракторной техники, технологического оборудования является наличие в них большого количества резьбовых соединений. В качестве крепежных элементов используют шпильки, винты, болты, гайки.

Негерметичность резьбовых соединений приводит к образованию щелей, где происходит интенсивная конденсация влаги, в них концентрируются различные загрязнения, что приводит к развитию щелевой коррозии. В результате разрушаются анодные участки поверхности щелевого соединения, которые находятся внутри.

Интенсивность коррозионных процессов в узких щелях объясняется тем, что влага в щелях в сравнении с открытой поверхностью высыхает дольше, и зависит от величины зазора. Это связано с наличием мениска у жидкости, находящейся в щели (рис. 1) [1].

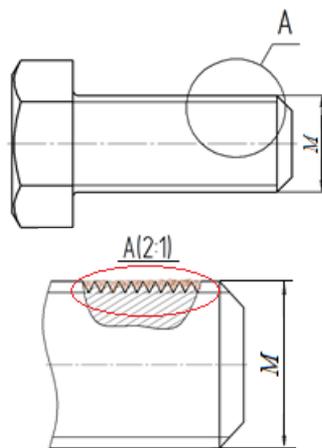


Р и с. 1. Мениск жидкости в щели:
r – радиус мениска; l – ширина щели

F i g. 1. The meniscus of the liquid in the gap:
r – radius of the meniscus; l – width of the gap

С уменьшением радиуса мениска упругость паров, находящихся в равновесии, снижается, что способствует повышению возможности конденсации паров на стенках зазора. Это приводит к ограниченному доступу кислорода, что определяет характер протекания анодных и катодных реакций. Например, в нейтральной среде интенсивность анодного процесса в щели повышается, а катодного – снижается [1]. Это объясняется тем, что анодные процессы протекают при более отрицательных значениях потенциала в связи с ограничением доступа кислорода в щель.

Щели образуются в самой резьбе болта или гайки (рис. 2), на наружных концах крепежных деталей, в резьбовом соединении и стыках соединяемых элементов (рис. 3) и т. д.

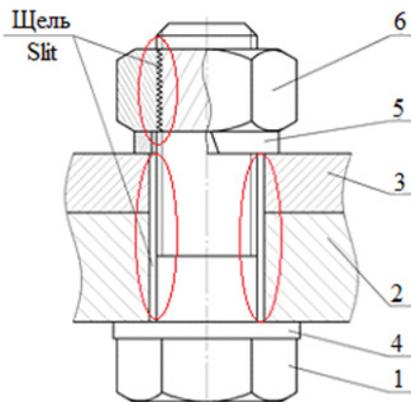


Р и с. 2. Щели в резьбе болта

F i g. 2. Bolt thread slits

Щелевая коррозия носит скрытый характер, вследствие чего ее своевременное выявление и принятие мер по нейтрализации затруднены. Это приводит

к существенным потерям металла и снижению механической прочности крепежных деталей, а также машин и конструкций в целом.



Р и с. 3. Щели в резьбовом соединении и стыках соединяемых элементов:

1 – болт; 2, 3 – соединяемые детали; 4 – шайба плоская; 5 – шайба пружинная; 6 – гайка

Fig. 3. Slits in the threaded connection and joints of the connected elements:

1 – bolt; 2, 3 – connected parts; 4 – flat washer; 5 – spring washer; 6 – nut

Целью исследования является разработка эффективного состава для защиты от коррозии и улучшения разборности резьбовых соединений.

Для реализации цели исследования нами проведены экспериментальные исследования по изучению влияния олигомера Д-10ТМ, выбор которого обоснован ниже, на противокоррозионные свойства заводских смазок и разборность резьбовых соединений.

Обзор литературы

Вопросы защиты резьбовых соединений от коррозии широко освещены в научной литературе.

Защита резьбовых соединений от коррозии, как утверждают ученые, возможна цинкованием крепежных деталей и нанесением на них лакокрасочных или других видов защитных покрытий [2]. Однако у цинкования имеются некоторые недостатки – это высокий коэффициент

трения оцинкованных крепежных деталей, что требует использования специальной смазки, и низкая экологичность [3].

Из результатов исследований, проведенных Л. В. Федоровой, С. К. Федоровым, В. Б. Саловым [4], следует, что противокоррозионные составы на водной основе, имеющие даже незначительный отрицательный заряд, отталкиваются от поверхности при их распылении на изделия, изготовленные из стали, так как сталь тоже имеет отрицательный электродный потенциал, равный $\varphi = -0,44$ В. В особенности это проявляется на острых краях деталей, в связи с чем на резьбе не обеспечивается необходимая толщина защитной пленки, поэтому эффективность и срок защиты от коррозии резьбовых соединений с использованием различных покрытий ограничены. Как утверждают некоторые исследователи [5; 6], обеспечить требуемую толщину защитной пленки возможно ингибированием коррозионной среды путем введения в нее соответствующих органических или неорганических соединений для смещения потенциала защитных составов в более положительную зону, что позволяет тормозить коррозионные процессы.

Почти все регулировочные работы при проведении технического обслуживания и ремонта машин, как указывает Н. В. Бышов с соавторами [7], предусматривают взаимное относительное перемещение деталей резьбового соединения, что затруднено из-за наличия в нем продуктов коррозии. Увеличение сопротивления закрепления или раскрепления деталей резьбового соединения часто служит причиной некачественной регулировки или невыполнения регулировочных операций, что способствует работе машины на неоптимальных режимах и ее преждевременному выходу из строя.

Анализ некоторых публикаций [8; 9] дает возможность утверждать, что для

обеспечения плотности стыка резьбовых соединений и надежности резьбового соединения нужно обеспечить необходимое усилие затяжки. В противном случае под воздействием различных эксплуатационных факторов крепежные элементы и само соединение могут выйти из строя. Необходимое усилие затяжки обеспечивается использованием динамометрического ключа, отрегулированного на определенный момент усилия затяжки. По мнению С. К. Федорова и Л. В. Федоровой, часть усилия при этом уходит на преодоление силы трения, на величину которой в первую очередь оказывает влияние наличие или отсутствие на поверхности деталей резьбового соединения продуктов коррозии [10]. Для снижения силы трения в резьбовом соединении используют различные смазки, которые выполняют и защитные функции, изолируя крепежные детали от агрессивного воздействия окружающей среды, что улучшает разборность соединения при необходимости в процессе эксплуатации машин.

На герметичность резьбового соединения также оказывают влияние химические фиксаторы резьбы, к которым относятся микрокапсулированный клей, наносимый на определенную зону резьбы, при затяжке резьбового соединения микрокапсулы лопаются, и клей затвердевает, создавая соединение, фиксирующее резьбу, а также полиамидные покрытия (эластичная пластмасса) [8]. Полиамид наносится на часть резьбы, при затяжке резьбового соединения зазор между резьбой винта и гайки заполняется полиамидом, обеспечивая хорошую фиксацию и контакт между сопрягаемыми резьбовыми поверхностями. Однако использование химических фиксаторов резьбы для повышения герметичности резьбового соединения ограничивается их высокой стоимостью и низкой технологичностью.

В настоящее время ассортимент материалов для смазки резьбовых соединений

довольно широк: солидол, литол, очистители, дисперсии, антифрикционные покрытия, пасты и др.

К сожалению, резьбовым соединениям и их смазке на практике не уделяют достаточного внимания или применяют смазку наугад, не учитывая условий работы и особенностей резьбового соединения. Например, по мнению Ву Динь Вуй, солидол нельзя применять для смазки резьбовых соединений, работающих в условиях повышенной температуры, так как уже при температуре в 80–85 °С он теряет смазывающие свойства (становится жидким) [11].

С учетом изложенного было бы эффективнее правильно подобрать и нанести на резьбу перед сборкой такую смазку, которая ликвидирует щели и зазоры в соединении, уплотняя его, изолирует от агрессивной окружающей среды, тем самым защитит от коррозии и улучшит разборность резьбового соединения.

В процессе эксплуатации в результате взаимодействия с агрессивными составляющими окружающей среды резьбовые соединения подвергаются коррозии и «прикипают». По этой причине их раскрепление может представлять определенные трудности: может разрушиться резьба, а может и сама крепежная деталь, в особенности, если соединение предварительно не обрабатывалось смазкой.

Резюмируя обзор исследований по тематике настоящей работы, можно отметить, что на данном этапе изысканий уже сформировалась достаточная информационная база по защите металлов, в том числе и резьбовых соединений, от коррозии. Анализ априорной информации также показал, что имеются резервы улучшения защиты от коррозии и разборности резьбовых соединений, к тому же сведений об улучшении разборности в научной литературе недостаточно.

Следовательно, исследования, связанные с улучшением защиты от коррозии и разборности резьбовых соединений,

являются актуальными и востребованными в агропромышленной и автотранспортной отраслях.

Материалы и методы

Материалом для изготовления крепежных деталей резьбовых соединений общего назначения являются низко- и среднеуглеродистые стали Ст3, Ст10, Ст20, Ст35, Ст45 и другие, поэтому в экспериментах использованы крепежные детали М10 с шагом резьбы 1,5 мм из стали Ст3, соединяющие два изделия (опытный образец), как показано на рисунке 4. Детали резьбового соединения образцов смазывали изучаемыми составами и затягивали на определенный момент усилия затяжки (80 Н·м) с использованием динамометрического ключа «AIST» двустороннего действия (рис. 4), который работает по принципу динамометра и представляет собой вороток с рычагом из пружинной стали.



Р и с. 4. Динамометрический ключ «AIST»

F i g. 4. Torque wrench “AIST”

На воротке закреплена стрелка-указатель, на рукояти – шкала, по которой определяется момент усилия затягивания или откручивания. При нагрузке на рукоять рычаг изгибается и положение указателя смещается по шкале. При моменте усилия затяжки 80 Н·м значение усилия предварительного натяжения будет в пределах 26,5 кН.

В качестве экспериментальных составов для обработки деталей резьбовых соединений исследовали солидол Ж-СКа 2/6-2 (ГОСТ 1033-79); литол-24 (ГОСТ 21150-87); солидол Ж-СКа 2/6-2 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе; литол-24 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе.

Олигомер Д-10ТМ растворяли в солидоле и литоле при температуре 50 °С простым смешиванием в течение 5 мин. По характеристике, приведенной в работе [12], олигомер Д-10ТМ представляет собой бесцветную или светло-желтую жидкость, растворим в органических растворителях и совместим с мономерами и олигомерами других типов, не растворим в воде. Пленка при ее хранении в воздухе существенно не изменяется достаточно долгое время. Выбор олигомера Д-10ТМ как добавки в заводские составы для повышения их свойств обоснован тем, что он обладает противокоррозионными свойствами, имеет трехмерную пространственную структуру и при затвердевании увеличивается в объеме [12].

В процессе проведения экспериментов опытные образцы (рис. 3) маркировали, обрабатывали соответствующим экспериментальным составом и погружали в коррозионную среду, в качестве которой служил 3%-й водный раствор хлорида натрия, и выдерживали в растворе в течение 8 ч. Раствор периодически перемешивали, а ее температуру поддерживали на уровне 22–24 °С. Затем образцы извлекали из раствора и оставляли в воздухе на 16 ч при комнатной температуре. Это составляло один цикл или 24 ч. Продолжительность экспонирования в соответствии с ГОСТ Р 9.905 – 2007 составляла 24, 48, 96, 240, 480, 720 ч или 1, 2, 4, 10, 20, 30 циклов. Количество образцов в вариантах экспериментов было по 5 штук, а количество вариантов (количество экспериментальных составов) – 4 (табл. 1). После соответствующего

цикла образцы раскрепляли с помощью динамометрического ключа «AIST», при этом по указанию стрелки на шкале фиксировали значение момента силы для раскрепления образцов, зная которое вычисляли величину коэффициента трения f в резьбовых соединениях. Для этого использовали выражение [13]:

$$M_p = F(r_{cp} \cdot \frac{tg\alpha + 1,15f}{1 - 1,15f} + f \cdot \frac{R+r}{2}) \cdot 9,8 \cdot 10^{-5}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (1)$$

где M_p – момент силы для раскрепления резьбовой пары, Н·м; r_{cp} – средний радиус резьбы, мм; F – усилие предварительного натяжения, Н; α – угол подъема резьбы, градус; f – коэффициент трения в резьбе и на поверхности контакта гайки и шайбы; R – наружный радиус поверхности между гайкой и шайбой, мм; r – внутренний радиус поверхности между гайкой и шайбой, мм.

После раскрепления образцов резьбовые детали изучали на наличие следов коррозии. Количество параллельных опытов по каждому варианту смазки было 5, результаты которых усредняли.

Результаты исследования

Результаты лабораторных исследований изучаемых составов смазок приведены в таблице 1 и на рисунке 6, из которых видно, что смазка № 4 лучше защищает резьбовое соединение от коррозии. Аналогичная ситуация имела место в работе [12] при добавлении олигомера Д-10ТМ в состав противокоррозионной мастики «Пластизоль Д-11А».

С увеличением продолжительности экспериментов до 720 ч значения коэффициента трения в резьбовых соединениях, обработанных составами № 1 и 2, интенсивно повышаются с 0,08 до 0,32 и 0,29 соответственно, в соединениях с составом № 3 интенсивное повышение коэффициента трения имеет место до

480 ч, затем процесс повышения выравнивается. В соединениях с составом № 4 наблюдается плавное незначительное повышение коэффициента трения, что объясняется отсутствием следов коррозии в резьбовой части соединений. Такое явление хорошо согласуется с данными, полученными авторами трудов [1; 2; 8; 9]. При осмотре резьбовой части крепежных деталей после раскрепления образцов со смазкой № 4 первые незначительные следы коррозии выявлены лишь после 720 ч экспериментов, когда в соединениях, обработанных составами № 1, 2 и 3, следы коррозии выявлены уже через 96, 96 и 240 ч соответственно. Результаты, полученные в рамках данного исследования, превосходят результаты наших исследований в работе [14].

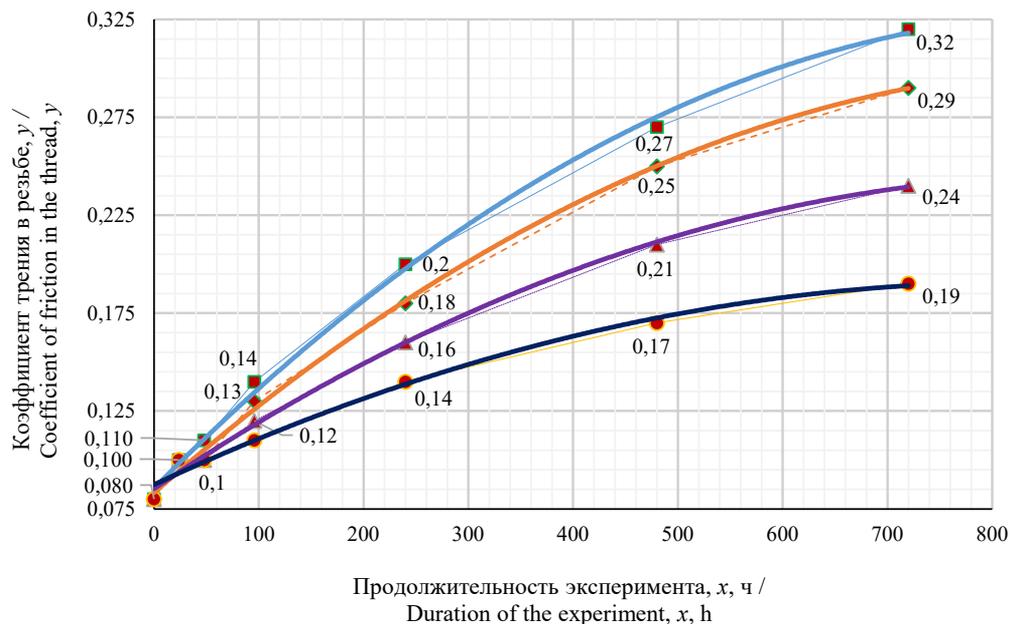
В сравнении с составами № 1 и 2 при использовании состава № 4 моменты силы для раскрепления образцов уменьшаются в 1,5–1,7 и 1,3–1,4 раза соответственно, следовательно, во столько же раз уменьшаются коэффициенты трения в резьбовых соединениях образцов.

Коррозионный износ в резьбовой части стержня болта снижает его прочность, что может привести к его разрушению при откручивании гайки с большим моментом силы [15].

Улучшение защитных свойств составов № 3 и 4 можно объяснить тем, что олигомер Д-10ТМ, имея полярные уретановые группы в цепи и высокую молекулярную массу, за счет образования водородных связей проявляет сильные межмолекулярные взаимодействия [12]. Его трехмерная пространственная структура обеспечивает лучшее заполнение щелей и зазоров в соединении, уплотняет их, изолирует от агрессивной среды и тем самым обеспечивает лучшую защиту от коррозии. Результаты, полученные в представленном исследовании, подтверждают результаты наших исследований в работе [5].

Результаты лабораторных исследований смазок
Results of laboratory studies of lubricants

Номер составов смазки / Numbers compositions lubricants	Состав смазки / Lubricant composition	Продолжительность эксперимента, ч / Length inhabitant duration of the experiment, h	Средние значения по 5 соединениям / Average values for 5 compounds		Наличие следов коррозии по 5-балльной шкале / Presence of traces of corrosion 5 point scale
			момента силы для раскрепления образцов, M_p , Н·м / moment of force to unfasten the specimens, M_p , N·m	коэффициента трения в резьбовом соединении, f / coefficient of friction in a threaded connection, f	
1	Солидол Ж-СКа 2/6-2 / Solid oil Zh-SKa 2/6-2	0	25,0	0,08	–
		24	30,3	0,10	–
		48	33,8	0,11	–
		96	42,4	0,14	1
		240	62,0	0,20	2
		480	83,1	0,27	3
		720	97,5	0,32	4
2	Литол-24 / Litol-24	0	25,0	0,08	–
		24	30,4	0,10	–
		48	30,2	0,10	–
		96	39,4	0,13	1
		240	54,5	0,18	1
		480	75,8	0,25	2
		720	88,5	0,29	3
3	Солидол Ж-СКа 2/6-2 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе / Solid oil Zh-SKa 2/6-2 + oligomer D-10TM 5% by weight	0	25,0	0,08	–
		24	30,3	0,10	–
		48	30,3	0,10	–
		96	37,0	0,12	–
		240	48,5	0,16	1
		480	63,6	0,21	2
		720	73,0	0,24	2
4	Литол-24 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе / Litol-24 + oligomer D-10TM 5% by weight	0	25,0	0,08	–
		24	30,2	0,10	–
		48	30,3	0,10	–
		96	33,8	0,11	–
		240	42,4	0,14	–
		480	52,3	0,17	–
		720	62,0	0,19	1



Р и с. 6. Зависимость коэффициента трения в резьбовых соединениях от продолжительности экспериментов по видам смазки:
 — солидол Ж-СКа 2/6-2; — литол-24; — солидол Ж-СКа 2/6-2 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе; — литол-24 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе
 Fig. 6. Dependence of the coefficient of friction in threaded connections on the duration of experiments by types of lubricant: — solid oil Zh-SKa 2/6-2; — litol-24; — solid oil Zh-SKa 2/6-2 + oligomer D-10TM 5% by weight; — litol-24 + oligomer D-10TM 5% by weight

Атмосфера помещений животно-водческих комплексов характеризуется содержанием коррозионно-агрессивных газов высокой концентрации, повышенной влажностью и слабой циркуляцией воздуха, что способствует коррозионному поражению резьбовых соединений и образованию в них продуктов коррозии [16; 17]. По этой причине в машинах и технологическом оборудовании животноводческих комплексов в процессе их эксплуатации количество трудноразборных и неразборных резьбовых соединений увеличивается, а легкоразборных – уменьшается, и производственные испытания состава № 4 проводили в условиях атмосферы животноводческого комплекса, которые подтвердили результаты лабораторных экспериментов.

Исследования проводили на двух кормораздатчиках КТУ-10 2015 и 2017 гг. выпуска, эксплуатируемых и содержащихся в идентичных условиях. На кормораздатчике 2015 г. выпуска резьбовые соединения в количестве 48 ед. были раскреплены, обработаны составом № 4 и собраны. На кормораздатчике 2017 г. выпуска резьбовые соединения оставили с заводской обработкой. Через каждые 12 месяцев эксплуатации по 12 идентичных резьбовых соединений обоих кормораздатчиков проверяли на наличие следов коррозии и степень разборности, результаты которых приведены в таблице 2.

Степень разборности резьбового соединения определяли следующим образом:

– легкоразборные – резьбовое соединение раскрепляется простым гаечным ключом без дополнительного смачивания специальным составом (проникающий спрей WD-40, перекись водорода и др.);

– трудноразборные – для раскрепления резьбового соединения требуется дополнительное смачивание специальным составом, после чего резьбовая пара разбирается простым гаечным ключом;

– неразборные – резьбовое соединение не раскрепляется после дополнительного смачивания специальным составом.

Из данных таблицы 2 видно, что с увеличением продолжительности эксплуатации кормораздатчиков КТУ-10 количество трудноразборных и неразборных резьбовых соединений увеличивается, а количество легкоразборных – уменьшается. При этом защищенность от коррозии резьбовых соединений, обработанных составом № 4, выше, чем

у резьбовых соединений с заводской обработкой.

Результаты производственных испытаний состава №4 коррелируют с результатами, полученными нами в работе [5]. Это дает основание рекомендовать данный состав для обработки резьбовых соединений с целью защиты их от коррозии и улучшения раскрепления после длительной эксплуатации машин и оборудования в коррозионно-агрессивной среде.

Обсуждение и заключение

На основании результатов проведенного исследования можно утверждать о разработке нового эффективного состава для защиты от коррозии и улучшения раскрепления резьбовых соединений, использование которого снижает момент силы для раскрепления резьбовых соединений в 1,3–1,7 раза в сравнении с заводскими смазками солидол Ж-СКа 2/6-2 и литол-24 и обеспечивает повышение

Т а б л и ц а 2

Table 2

Характеристика резьбовых соединений в зависимости от обработки и продолжительности эксплуатации кормораздатчиков КТУ-10

Characteristics of threaded connections depending on the processing and duration of operation of feeders КТУ-10

Продолжительность эксплуатации, мес. / duration of operation, months	Наличие следов коррозии по 5-балльной шкале / Presence of traces of corrosion 5 point scale		Разборность резьбовых соединений, % / Collapsibility of threaded connections, %					
			легко разборные / easily collapsible		трудно разборные / difficult collapsible		неразборные / not collapsible	
	Обработка заводская / Factory processing	Обработка составом № 4 / Processing with composition No. 4	Обработка заводская / Factory processing	Обработка составом № 4 / Processing with composition No. 4	Обработка заводская / Factory processing	Обработка составом № 4 / Processing with composition No. 4	Обработка заводская / Factory processing	Обработка составом № 4 / Processing with composition No. 4
12	1	–	90	100	1	0	0	0
24	2	–	80	90	10	10	10	0
36	4	1	60	80	20	20	20	0
48	5	1	30	60	40	30	30	10

качества проведения регулировочных и ремонтных работ, что представляет практическую значимость нашего исследования. Цель исследования выполнена.

Можно сформулировать рекомендации для работников ремонтного производства предприятий агропромышленного комплекса:

1) резьбовые соединения перед сборкой необходимо обработать специальной смазкой, для этого лучше использовать

разработанный нами состав литол-24 + олигомер Д-10ТМ 5% по массе;

2) при выборе смазки нужно учитывать условия работы и особенности резьбового соединения;

3) резьбовые соединения снаружи должны быть обработаны защитными или лакокрасочными покрытиями, изолирующими их от окружающей среды;

4) выступающая из гайки часть болта не должна превышать 1–2 витка резьбы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние величины зазора на скорость щелевой коррозии автотракторной техники / Н. В. Бышов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2020. № 2 (58). С. 328–337. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-02-32>

2. Повышение усталостной прочности метрической резьбы упрочняющим электромеханическим восстановлением / В. Б. Салов [и др.] // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 2 (18). С. 106–111. URL: [https://www.vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a24/vestnik-2012-2\(18\).pdf](https://www.vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a24/vestnik-2012-2(18).pdf) (дата обращения: 22.03.2023).

3. Повышение эксплуатационных свойств резьбовых соединений электромеханической обработкой / Л. В. Федорова [и др.] // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В. П. Горячкина. 2010. № 2 (41). С. 109–112. EDN: **NGFBIV**

4. Федорова Л. В., Федоров С. К., Салов В. Б. Формирование эксплуатационных показателей резьбы электромеханической обработки // Труды ГОСНИТИ. 2009. Т. 103. С. 35–37. EDN: **КУСАКД**

5. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники / И. В. Фадеев [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2020. № 3 (59). С. 365–376. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-39>

6. Кузнецов Ю. И., Казанский Л. П. Физико-химические аспекты защиты металлов ингибиторами коррозии класса азолов // Успехи химии. 2008. Т. 77, № 3. С. 227–241. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n03ABEH003753>

7. Ингибитор коррозии металлов для использования при ремонте автотракторной техники / Н. В. Бышов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2019. № 2. С. 265–275. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-02-32>

8. Корнилов С. А., Соловьев В. А. Пути обеспечения плотности стыка резьбовых соединений при производстве, техническом обслуживании и ремонте машин сельскохозяйственного назначения // Омский научный вестник. 2013. № 1 (117). С. 68–71. URL: http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2013n/1_117_2013/59136_mashinostroenie.pdf (дата обращения: 22.03.2023).

9. Соловьев В. Л. Повышение точности контроля усилия затяжки при сборке групповых резьбовых соединений // Вестник СибАДИ. 2013. № 3 (31). С. 67–70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tochnosti-kontrolya-usiliya-zatyazhki-pri-sborke-grupповых-rezbovyyh-soedineniy/viewer> (дата обращения: 22.03.2023).

10. Федоров С. К., Федорова Л. В. Восстановление резьбы электромеханической обработкой // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2003. № 1–2 (21–22). С. 36–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vosstanovlenie-rezby-elektromehanicheskoy-obrabotkoy/viewer> (дата обращения: 22.03.2023).

11. Ву Динь Вуй. Атмосферная коррозия металлов в тропиках. М. : Наука, 1994. 240 с. URL: <https://markmet.ru/kniga-po-metallurgii/atmosfernaya-korroziya-metallov-v-tropikakh> (дата обращения: 22.03.2023).

12. Фадеев И. В., Ременцов А. Н. Установление периодичности противокоррозионной обработки кузовов легковых автомобилей // Вестник МАДИ. 2010. Вып. 2 (21). С. 15–17. EDN: **MWAQSB**

13. Федоров С. К., Федорова Л. В. Отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка резьбовых поверхностей // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2002. № 1 (7). С. 104–108. EDN: **TJTHHX**

14. Фадеев И. В., Садетдинов Ш. В. Повышение коррозионной стойкости стали 10 // Вестник МАДИ. 2015. Вып. 2 (41). С. 107–114. EDN: **TUVQMB**

15. Повышение эффективности противокоррозионной защиты стыковых и сварных соединений сельскохозяйственных машин консервационными материалами / А. В. Шемякин [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 87–91. URL: <https://science.swsu.ru/assets/js/viewer/web/viewer.html?file=https://science.swsu.ru/jour/article/viewFile/42/42#page=1&zoo m=auto,-16,34> (дата обращения: 22.03.2023).

16. Кузин Е. Г. Щелевая коррозия в соединениях сельскохозяйственных машин // Новая наука: Проблемы и перспективы. 2016. № 115 (2). С. 180–183. EDN: **XBPUQJ**

17. Лисунов Е. А., Миронов Е. Б., Гладцын А. Ю. Процесс образования и развития электрохимической коррозии сельскохозяйственной техники // Аграрный вестник Верхневолжья. 2015. № 4 (12). С. 49–52. URL: https://ivgsha.ru/vestnik/vestnik4_2015.pdf (дата обращения: 22.03.2023).

Поступила 24.03.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 10.05.2023

Об авторах:

Шемякин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации транспортных процессов и безопасности жизнедеятельности Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, avtodor-dec@mail.ru

Фадеев Иван Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиноведения Чувашияского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева (428003, Российская Федерация, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ivan-fadeev-2012@mail.ru

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

Юхин Иван Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, yuival@rambler.ru

Чаткин Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Шемякин – научное руководство; постановка задачи исследования.

И. В. Фадеев – разработка методик и проведение лабораторных экспериментальных исследований.

И. А. Успенский – разработка методик и проведение производственных исследований.

И. А. Юхин – проведение вычислений.
М. Н. Чаткин – анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Byshov N.V., Fadeev I.V., Uspensky I.A., et al. Influence of the Size of the Gap on the Rate of Crevice Corrosion of Automotive Equipment. *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*. 2020;(2):328–337. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-02-32>
2. Salov V.B., Fedorova L.V., Fedorov S.K., Freeling V.A. Increasing the Fatigue Strength of a Metric Thread by Strengthening Electromechanical Restoration. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2012;(2):106–111. Available at: [https://www.vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a24/vestnik-2012-2\(18\).pdf](https://www.vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a24/vestnik-2012-2(18).pdf) (accessed 22.03.2023).
3. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Nagnibedova E.V., Salov V.B. Improving the Performance Properties of Threaded Joints by Electromechanical Processing. *Vestnik of federal state educational institution of higher professional education "Moscow state agroengineering university named after V. P. Goryachkin"*. 2010;(2):109–112. EDN: NGFBIV
4. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Salov V.B. [New Corrosion Inhibitors for the Protection of Agricultural Machinery]. *Trudy GOSNTY*. 2009;103:35–37. (In Russ.) EDN: KYCAKD
5. Fadeev I.V., Uspensky I.A., Pstryaeva L.Sh., et al. New corrosion inhibitors for the protection of agricultural machinery. *Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex*. 2020;(3):365–376. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-03-39>
6. Kuznetsov Yu.I., Kazansky L.P. Physicochemical Aspects of Metal Protection by Azoles as Corrosion Inhibitors. *Russian Chemical Reviews*. 2008;77(3):227–241. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n03A-BEH003753>
7. Byshov N.V., Polishchuk S.D., Fadeev I.V., Sadetdinov Sh.V. Inhibitor of Metal Corrosion for use during Repairing Automotive Equipment. *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*. 2019;(2):265–275. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-02-32>
8. Kornilovich S.A., Soloviev V.A. [Ways to Ensure the tightness of the Joint of Threaded Joints in the Production, Maintenance and Repair of Agricultural Machines]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2013;(1):68–71. Available at: http://vestnik.omgtu.ru/images/stories/arhiv/2013n/1_117_2013/59-136_mashinostroenie.pdf (accessed 22.03.2023).
9. Soloviev V.L. Improving the Accuracy of Torque Controlled Preloading While Assembling of Group Threaded Connections during Maintenance of different Machinery. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013;(3):67–70. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tochnosti-kontrolya-usiliya-zatyazhki-pri-sborke-grupповыh-rezbovyh-soedineniy/viewer> (accessed 22.03.2023).
10. Fedorov S.K., Fedorova L.V. [Thread restoration by electromechanical processing] *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*. 2003;(1-2):36–39. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vosstanovlenie-rezby-elektromehaneskoy-obrabotkoy/viewer> (accessed 22.03.2023).
11. Dinh Wuy [Atmospheric Corrosion of Metals in the Tropics.] Moscow: Nauka; 1994. Available at: <https://markmet.ru/kniga-po-metallurgii/atmosfernaya-korroziya-metallov-v-tropikakh> (accessed 22.03.2023).
12. Fadeev I.V., [Establishing the frequency of anticorrosion treatment of car bodies.] *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2010;(2):15–17. EDN: MWAQSB
13. Fedorov S.K., Fedorova L.V. [Finishing and hardening electromechanical processing of threaded surfaces.] *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*. 2002;(1):104–108. EDN: TJTHHX
14. Fadeev I.V., Sadetdinov Sh.V. [Improving the corrosion resistance of steel 10.] *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2015;(2):107–114. EDN: TUVQMB

15. Shemyakin A.V., Latyshenok M.B., Terent'ev V.V., et al. Improving Efficiency of Anticorrosive Protection of Butt- Welded Joints in Agricultural Machinery Using Conservation Materials. *Proceedings of the Southwest State University*. 2016;(2):87–91. Available at: <https://science.swsu.ru/assets/js/viewer/web/viewer.html?file=https://science.swsu.ru/jour/article/viewFile/42/42#page=1&zoom=auto,-16.34> (accessed 22.03.2023).

16. Kuzin E.G. [Crevice Corrosion in the Joints of Agricultural Machines]. *Novaya nauka: Problemy i perspektivy*. 2016;(2):180–183. EDN: **XBPUQJ**

17. Lisunov E.A., Mironov E.B., Gladtsyn A. Yu. [The Process of Formation and Development of Electrochemical Corrosion of Agricultural Machinery]. *Agrarian Journal of Upper Volga Region*. 2015;(4):49–52. Available at: https://ivgsha.ru/vestnik/vestnik4_2015.pdf (accessed 22.03.2023).

Submitted 24.03.2023; revised 24.04.2023; accepted 10.05.2023

About the authors:

Alexander V. Shemyakin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of the Department of Organization of Transport Processes and Life Safety, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, avtodor-dec@mail.ru

Ivan V. Fadeev, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Head of Mechanical Engineering Chair, Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (38 K. Marks St., Cheboksary 428003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Ivan A. Uspensky, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of Technical Operation of Transport Chair, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Department of Automotive and Tractor Engineering and Thermal Power Engineering, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, yuival@rambler.ru

Mikhail N. Chatkin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of the Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru

Authors contribution:

A. V. Shemyakin – scientific supervision; the formulation of the research problem.

I. V. Fadeev – developing the methods and laboratory experimental studies.

I. A. Uspensky – developing the methods and conducting industrial experimental studies.

I. A. Yukhin – carrying out calculate.

M. N. Chatkin – reviewing and analyzing the literature.

All authors have read and approved the final manuscript.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ / INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

УДК 519.62:678.7

doi: 10.15507/2658-4123.033.202302.270-287

Оригинальная статья



Алгоритм оценки молекулярных характеристик полимерного продукта в условиях многоточечного регулирования

Э. Н. Мифтахов¹ ✉, С. А. Мустафина¹, И. Ш. Насыров²,
Н. Д. Морозкин¹

¹ Уфимский университет науки и технологий
(г. Уфа, Российская Федерация)

² Акционерное общество «Синтез-Каучук»
(г. Стерлитамак, Российская Федерация)

✉ promif@mail.ru

Аннотация

Введение. В условиях высокого спроса на резинотехнические изделия ведется постоянная модернизация технологических процессов непрерывного производства. Одним из инструментов управления физико-химическими параметрами получаемого продукта является технология многоточечной подачи регулирующих примесей, способная значительно повлиять на молекулярные характеристики полимеров. Однако экспериментально подобрать технологию многоточечной подачи регулирующих примесей для достижения заданных молекулярных характеристик полимеров сложно.

Цель статьи. Создание методологии, позволяющей с использованием инструментов модельного описания системы осуществлять направленное регулирование и построение технологического процесса для достижения заданного молекулярно-массового распределения.

Материалы и методы. В целях более точного математического моделирования процессов синтеза полимеров рассмотрены два подхода к модельному описанию исследуемой системы: кинетический и статистический (метод Монте-Карло) подходы. В первом случае разработанный алгоритм основан на методе моментов в сочетании с численными методами решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, характеризующих изменение материального баланса по каждому компоненту реакции. При описании крупнотоннажного производства предлагается модульный принцип, в соответствии с которым модель кинетики дополняется гидродинамическими закономерностями, зависящими от типа реактора. Во втором случае алгоритм реализации статистического подхода основан на вероятностной природе протекания элементарных реакций. Для описания процесса в каскаде реакторов предложен системный подход к организации вычислений.

© Мифтахов Э. Н., Мустафина С. А., Насыров И. Ш., Морозкин Н. Д., 2023



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

Результаты исследования. С использованием кинетического и статистического подходов получены новые зависимости конверсии и характеристической вязкости от номера полимеризатора, показавшие удовлетворительное согласование со значениями результатов эксперимента. Проведен сравнительный анализ рассчитанных кривых молекулярно-массового распределения получаемого продукта. Анализ подтверждает значительное влияние различных режимов подачи регулятора на молекулярные характеристики полимера.

Обсуждение и заключение. Проведенный анализ структуры молекулярных звеньев продукта сополимеризации в условиях добавления третьей точки регулирования характеризует снижение жесткости и увеличение эластичности получаемого продукта, а созданные цифровые инструменты оценки позволяют путем проведения вычислительных экспериментов подбирать оптимальные параметры подачи регулятора с целью получения полимеров с заданной молекулярной массой.

Ключевые слова: синтетический каучук, полимер, каскад реакторов, математическое моделирование, численные методы, регулирование молекулярной массы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FZWU-2023-0002).

Для цитирования: Алгоритм оценки молекулярных характеристик полимерного продукта в условиях многоточечного регулирования / Э. Н. Мифтахов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 270–287. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.270-287>

Original article

Algorithm for Evaluation of the Molecular Characteristics of a Polymer Product under Conditions of Multipoint Control

E. N. Miftakhov^a , S. A. Mustafina^a, I. Sh. Nasyrov^b,
N. D. Morozkin^a

^a Ufa University of Science and Technology
(Ufa, Russian Federation)

^b Joint Stock Company Sintez-Kauchuk
(Sterlitamak, Russian Federation)

 promif@mail.ru

Abstract

Introduction. Under conditions of high demand for rubber products, continuous modernization of technological processes of continuous production is carried out. One of the tools to control the physical and chemical parameters of the resulting product is the technology of multipoint feeding of controlling impurities that can significantly affect the molecular characteristics of polymers. However, it is difficult to experimentally select the technology of multipoint feeding of controlling impurities to achieve the given molecular characteristics of polymers.

Aim of the Article. To create a methodology that allows using the tools of model system description to carry out directed regulation and construction of the technological process to achieve a given molecular weight distribution.

Materials and Methods. For more accurate mathematical modeling of polymer synthesis processes, two approaches to the model description of the system under study are considered: 1) Kinetic approach. In this case, the developed algorithm is based on the method of moments in combination with numerical methods for solving systems of ordinary differential equations

that characterize the change in the material balance for each reaction component. When describing large-tonnage production, a modular principle is proposed, according to which the kinetics model is supplemented by hydrodynamic regularities that depend on the reactor type. 2) Statistical approach (Monte Carlo method). The algorithm for implementing the statistical approach is based on the probabilistic nature of elementary reactions. To describe the process in the reactor cascade, a systematic approach to the organization of calculations is proposed.

Results. Using kinetic and statistical approaches new dependences of conversion and characteristic viscosity on polymerizer number were obtained, which showed satisfactory agreement with the values of the experimental results. Comparative analysis of calculated molecular-mass distribution curves of obtained product was carried out. The analysis confirms the significant influence of different modes of regulator feeding on molecular characteristics of polymer.

Discussion and Conclusion. The analysis of the molecular chain structure of the copolymerization product under conditions of adding the third control point characterizes the decrease in rigidity and increase in elasticity of the resulting product, and the created digital evaluation tools allow by means of computational experiments to select optimal parameters of the regulator feeding in order to obtain polymers with a given molecular mass.

Keywords: synthetic rubber, polymer, cascade of reactors, mathematical modeling, numerical methods, molecular weight control

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

Acknowledgments: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific code FZWU-2023-0002).

For citation: Miftakhov E.N., Mustafina S.A., Nasyrov I.Sh., Morozkin N.D. Algorithm for Evaluation of the Molecular Characteristics of a Polymer Product under Conditions of Multipoint Control. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):270–287. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.270-287>

Введение

Результатом спроса на резинотехнические изделия стало создание крупных промышленных производств синтетического каучука, история которого насчитывает уже более 100 лет [1]. Несмотря на большой исторический опыт предприятия вынуждены постоянно реагировать на современные требования рынка и корректировать технологические аспекты производства. Синтетический каучук относится к классу высокомолекулярных соединений, распределение которых по молекулярной массе определяет его физико-химические и потребительские свойства [2].

Управление молекулярной массой получаемого продукта производится добавлением реагентов [3–5], выполняющих роль регулятора, в исходную реакционную смесь, которые принудительно вызывают обрыв и передачу цепи. Реакция передачи цепи используется для регулирования молекулярной массы полимера, получения

высокомолекулярных соединений с заданной молекулярной массой и полидисперсностью, а также для получения низкомолекулярных соединений.

Достаточно высокая реакционная способность регулятора приводит к его быстрому расходу и, как следствие, значительному повышению молекулярной массы продукта. Одним из путей решения является использование многоточечной подачи реагентов в технологический процесс.

В условиях действующего промышленного производства экспериментальным путем оценить влияние, оказываемое в результате многоточечной подачи реагентов, практически невозможно. Все более актуальным в этом случае становится вопрос развития математических подходов и вычислительных методов, позволяющих с использованием инструментов модельного описания системы воспроизводить различные сценарии с целью оценки влияния параметров исходной реакционной смеси и технологических

аспектов непрерывного производства на физико-химические свойства продукта.

Целью данной работы является создание методологии, позволяющей с использованием инструментов модельного описания системы осуществлять направленное регулирование и построение технологического процесса для достижения заданного молекулярно-массового распределения.

Обзор литературы

Современные тенденции исследования новых и действующих промышленных процессов все чаще направлены на применение модельного подхода, позволяющего путем построения математической модели и проведения вычислительных экспериментов прогнозировать свойства продукта для различных исходных данных. Методы моделирования, применимые к процессам, лежащим в основе синтеза полимеров, направлены на решение задач поиска усредненных молекулярно-массовых и вязкостных показателей образующегося полимера [6; 7]. Математическое описание исследуемого процесса при этом базируется на представлении кинетического механизма [8] ведения элементарных реакций.

Математическое моделирование процессов синтеза полимеров предполагает применение двух подходов: кинетического [9] и статистического [10; 11]. В рамках реализации кинетического подхода предлагается формирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений, характеризующих изменение материального баланса по каждому компоненту реакции и численное ее решение. В силу достаточно высокой размерности образуемой системы дифференциальных уравнений (порядка 10^6) применяется переход к усредненным молекулярным характеристикам с использованием статистических моментов молекулярно-массового распределения [12].

Основы моделирования процессов полимеризации и расчеты кинетических схем подробно представлены в работах

отечественных ученых [8; 9; 13–15]. В зависимости от числа используемых мономеров и особенностей реализации процесса предлагается применять метод моментов [12] или метод производящих функций [16; 17].

В рамках описания крупнотоннажного производства предлагается модульный принцип построения модели, в соответствии с которым модель кинетики дополняется соответствующими гидродинамическими закономерностями, вид которых зависит от типа реакторов и системы организации непрерывного процесса [18]. Особенности моделирования процессов, протекающих в реакторах различных типов, а также изменение природы смещения реакционной смеси описаны в работах Р. Ариса, А. А. Берлина, С. А. Вольсона [19; 20]. В рамках реализации системного подхода вычислительные эксперименты по оценке характеристик продукта в пусковом режиме непрерывного производства были проведены ранее для процесса полимеризации изопрена на неодимсодержащих каталитических системах с модифицирующими присадками ТЕА или ТГА [21] и на титансодержащей каталитической системе [22]. К недостаткам реализации кинетического подхода в большинстве случаев относят ориентацию на расчет только усредненных молекулярных характеристик, а распределение образуемых макромолекул в таком случае воспроизводят с применением модельных функций в условиях принятия ряда допущений, что не всегда применимо к процессам промышленного производства полимеров.

Статистический подход (метод Монте-Карло) основан на вероятностной природе протекания реакций и учете каждой реакции как случайного события, вероятность которой зависит от различных факторов. Для реализации данного подхода наиболее удачно применим алгоритм Д. Гиллеспи [23]. В сравнении с кинетическим подходом проведение расчетов по статистическому подходу занимает гораздо

большее время, однако позволяет детально подойти к вопросу исследования молекулярной структуры образуемого продукта. Основной проблемой реализации статистического подхода является низкая скорость расчетов, которая вынуждает использовать для расчетов малый объем ансамбля макромолекул и оптимизировать создаваемые алгоритмы под технологии параллельных вычислений.

Модификация математического описания под непрерывный режим производства требует введения стохастических величин, которые определяют вероятность нахождения макромолекулы в том или ином реакторе каскада. В этом случае стоит говорить о некотором среднем времени пребывания как о случайной величине, которая характеризуется вероятностной функцией распределения [24; 25].

Применение метода Монте-Карло к моделированию процессов полимеризации представлено в работах отечественных и зарубежных исследователей [26–30]. В частности, представлены алгоритмы моделирования процесса катионной сополимеризации изобутилена с изопреном [31], процесса полимеризации изопрена в присутствии каталитической системы $TiCl_4-tBuCl$ с применением инверсного алгоритма [32].

С целью снижения временных затрат на организацию вычислений отдельно стоит выделить метод, основанный на идее воспроизведения цепи полимера из небольших фрагментов (блоков связей) [33; 34], концентрация которых может быть получена путем применения кинетического подхода. Под блоком связей понимается некая совокупность связанных между собой звеньев. В работе [35] концепция блоков связей использована для анализа кинетики сополиконденсации и структуры сополимеров. В работе [36] продемонстрирована возможность простого и адекватного прогнозирования топологической структуры модифицированных эпоксиаминных матриц, основанная на концепции блоков

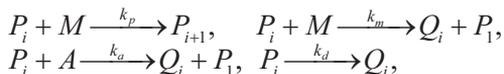
связей, сочетающей в себе кинетический и статистический подходы. В работе [37] концепция блоков связей была модифицирована и предложен алгоритм для процессов радикальной полимеризации.

Материалы и методы

Опишем основные этапы комплексного подхода, определяющие основу создания алгоритмов решения задач эмпирической оценки свойств продукта для различных режимов регулирования.

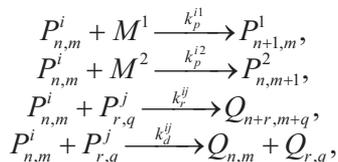
Этап 1. Кинетический механизм, определяет основные элементарные реакции, приводящие к образованию высокомолекулярных соединений. Данный шаг необходим для модельного описания в рамках реализации как кинетического, так и статистического подхода.

Для процессов гомополимеризации характерно наличие лишь одного вида мономера M , а кинетическая схема включает в себя стадии роста цепи, передачи цепи на мономер, на алюминийорганическое соединение (регулятор) и гибели активных центров



где M – концентрация мономера; A – концентрация АОС; P_i – активная («растущая») цепь полимера длиной i ; Q_i – неактивная («мертвая») цепь полимера длиной i ; k_p, k_m, k_a, k_d – константы, характеризующие скорость реакции роста цепи, передачи на мономер, на алюминийорганическое соединение и гибели активных центров соответственно.

Для процессов сополимеризации характерно наличие двух видов мономеров M^1 и M^2 . Как следствие, кинетический механизм процесса усложняется и характеризуется четырьмя типами реакций роста и обрыва цепей:



где $P_{n,m}$, $Q_{n,m}$ – активная и неактивная цепь сополимера длиной $n + m$, содержащая n звеньев мономера бутадиена и m звеньев стирола, i характеризует тип мономера на конце растущей цепи.

Доминирующую роль в обрыве цепочек макромолекул выполняет стадия взаимодействия с молекулами регулятора S



Этап 2. Построение математической модели в рамках реализации кинетического подхода подразумевает формирование соответствующей модели в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, характеризующих изменение материального баланса по каждому компоненту реакций. Размерность полученной системы пропорциональна длине образуемых макромолекул, которая может достигать до 10^6 . Анализ характеристик получаемого продукта в этом случае предполагает использование моментов активных μ_j и неактивных цепей η_j [12] j -го порядка, которые для процессов гомополимеризации примут вид:

$$\mu_j = \sum_{i=2}^{+\infty} i^j P_i, \quad \eta_j = \sum_{i=2}^{+\infty} i^j Q_i. \quad (1)$$

Полученные значения необходимы для расчета среднечисленной M_n и среднечисловой M_w молекулярной массы:

$$M_n = m_0 \frac{\mu_1 + \eta_1}{\mu_0 + \eta_0}, \quad M_w = m_0 \frac{\mu_2 + \eta_2}{\mu_1 + \eta_1}, \quad (2)$$

где m_0 – молекулярная масса исходного мономера.

Выражения для статистических моментов для процессов сополимеризации будут зависеть от молярной массы мономеров первого и второго типа M_a , M_b :

$$\psi_k^{M^1} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} (nM_a + mM_b)^k P_{n,m}^1, \quad (3)$$

$$\psi_k^{M^2} = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} (nM_a + mM_b)^k P_{n,m}^2,$$

$$\psi_k^Q = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} (nM_a + mM_b)^k Q_{n,m}. \quad (4)$$

На основании полученных значений можно будет идентифицировать усредненные молекулярные массы продукта

$$\begin{aligned} \bar{M}_n^Q &= \frac{\psi_1^{M^1} + \psi_1^{M^2} + \psi_1^Q}{\psi_0^{M^1} + \psi_0^{M^2} + \psi_0^Q}, \\ \bar{M}_w^Q &= \frac{\psi_2^{M^1} + \psi_2^{M^2} + \psi_2^Q}{\psi_1^{M^1} + \psi_1^{M^2} + \psi_1^Q}. \end{aligned} \quad (5)$$

Этап 3. Адаптация модельного описания под масштаб производства подразумевает учет соответствующих гидродинамических закономерностей, различающихся от типа реактора. В условиях отечественного промышленного производства непрерывный процесс реализуется в каскаде реакторов идеального перемешивания непрерывного действия. Учитывая высокую скорость перемешивания, можно считать, что в любой момент времени отсутствуют градиенты температуры и концентраций реагентов в реакторе. Моменты молекулярно-массового распределения в этом случае можно выразить через рекуррентные соотношения [8]:

$$\frac{(\bar{Y}^{(k-1)} - \bar{Y}^{(k)})}{\theta^{(k)}} + \bar{R}_y^{(k)} = 0, \quad (6)$$

где $\theta^{(k)}$ – время нахождения реакционной смеси в k -том реакторе каскада; вид $\bar{R}_y^{(k)}$ определяется принятым кинетическим модулем, а вектор Y – размерностью исходной системы уравнений. Использование (6) для модельного описания позволяет выявить закономерности изменения характеристик [38] в статических режимах производства, для которых характерно отсутствие изменений концентраций исходных веществ в пределах одного реактора.

В частности, для представленной выше кинетической схемы процесса сополимеризации модельное описание примет вид системы нелинейных алгебраических уравнений, решаемых с использованием классических численных методов:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{I^{(k-1)} - I^{(k)}}{\theta^{(k)}} - k_i I^{(k)} = 0, \\
 & \frac{M^{1(k-1)} - M^{1(k)}}{\theta^{(k)}} - k_{p11} M^{1(k)} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} P_{n,m}^{1(k)} - \\
 & - k_{p21} M^{1(k)} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} P_{n,m}^{2(k)} = 0, \\
 & \frac{M^{2(k-1)} - M^{2(k)}}{\theta^{(k)}} - k_{p12} M^{2(k)} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} P_{n,m}^{1(k)} - \\
 & - k_{p22} M^{2(k)} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} P_{n,m}^{2(k)} = 0, \\
 & \frac{S^{(k-1)} - S^{(k)}}{\theta^{(k)}} - k_{reg1} S^{(k)} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} P_{n,m}^{1(k)} - \\
 & - k_{reg2} S^{(k)} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} P_{n,m}^{2(k)} = 0, \\
 & \frac{\psi_0^{Q(k-1)} - \psi_0^{Q(k)}}{\theta^{(k)}} + \left(\frac{1}{2} k_{r11} + k_{d11} \right) \left(\psi_0^{M^1(k)} \right)^2 + \\
 & + (k_{r12} + 2k_{d12}) \psi_0^{M^1(k)} \psi_0^{M^2(k)} + \\
 & + \left(\frac{1}{2} k_{r22} + k_{d22} \right) \left(\psi_0^{M^2(k)} \right)^2 + k_{reg1} S^{(k)} \psi_0^{M^1(k)} + \\
 & + k_{reg2} S^{(k)} \psi_0^{M^2(k)} = 0, \\
 & \frac{\psi_1^{Q(k-1)} - \psi_1^{Q(k)}}{\theta^{(k)}} + (k_{r11} + k_{d11}) \psi_0^{M^1(k)} \psi_1^{M^1(k)} + \\
 & + k_{reg1} S^{(k)} \psi_1^{M^1(k)} + k_{reg2} S^{(k)} \psi_1^{M^2(k)} + \\
 & + (k_{r12} + k_{d12}) \left(\psi_0^{M^1(k)} \psi_1^{M^2(k)} + \psi_1^{M^1(k)} \psi_0^{M^2(k)} \right) + \\
 & + (k_{r22} + k_{d22}) \psi_0^{M^2(k)} \psi_1^{M^2(k)} = 0, \\
 & \frac{\psi_2^{Q(k-1)} - \psi_2^{Q(k)}}{\theta^{(k)}} + (k_{r11} + k_{d11}) \psi_0^{M^1(k)} \psi_2^{M^1(k)} + \\
 & + k_{reg1} S^{(k)} \psi_2^{M^1(k)} + k_{reg2} S^{(k)} \psi_2^{M^2(k)} + \\
 & + (k_{r12} + k_{d12}) \left(\psi_0^{M^1(k)} \psi_2^{M^2(k)} + \psi_2^{M^1(k)} \psi_0^{M^2(k)} \right) + \\
 & + (k_{r22} + k_{d22}) \psi_0^{M^2(k)} \psi_2^{M^2(k)} + \\
 & + k_{r11} \left(\psi_1^{M^1(k)} \right)^2 + 2k_{r12} \psi_0^{M^1(k)} \psi_1^{M^2(k)} + \\
 & + k_{r22} \left(\psi_1^{M^2(k)} \right)^2 = 0.
 \end{aligned} \right\}$$

С начальными условиями:

$$\begin{aligned}
 I^{(0)}(0) &= I_0, M^{1(0)}(0) = M_0^1, \\
 M^{2(0)}(0) &= M_0^2, S^{(0)}(0) = S_0, \\
 \psi_i^{Q(0)}(0) &= \psi_i^{M^1(0)}(0) = \\
 &= \psi_i^{M^2(0)}(0) = 0, i = 0, 1, 2. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Этап 4. Реализация статистического подхода [39] к моделированию процесса подразумевает постоянную фиксацию в динамической памяти компьютера всех переменных, определяющих структуру и молекулярную цепочку каждой из макромолекул. Объем моделируемого ансамбля, определяющего реакционный объем, влияет на скорость моделирования и точность получаемых расчетных результатов, однако его задаваемая величина должна гарантировать получение устойчивых результатов в условиях многочисленных вычислительных экспериментов.

После формального описания кинетического механизма необходимо определить весь реакционный объем, который позволит рассчитать скорость осуществления каждой реакции в соответствии с выражением $R_i = k_i X_A X_B$, где k_i – константа, характеризующая скорость реакции под номером i , в которой принимают участие реагенты A и B ; X_A, X_B – молекулярная концентрация этих реагентов. Полученные значения в свою очередь используются для определения вероятности осуществления каждой реакции $p_i = R_i / (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$, а генерация случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0; 1]$, позволяет сделать выбор реакции и ее имитационное исполнение, под которым подразумевается набор действий, происходящих в этот момент в системе: уменьшение количества молекул одного реагента и увеличение молекулярной концентрации другого. Для выбора и исполнения очередной реакции требуется пересчитать все вероятности, поскольку концентрация реагентов каждый раз меняется.

Для процессов сополимеризации реализация алгоритмов не будет иметь конструктивные отличия кроме увеличения количества используемых динамических переменных для осуществления расчетов и добавления еще одной размерности, отвечающей за номер типа присоединяемого мономера.

Этап 5. Адаптация статистического подхода под крупнотоннажный режим производства требует введения параметра, характеризующего вероятность пребывания макромолекулы в том или ином реакторе каскада. При достижении порогового значения времени осуществляется программный перевод макромолекулы и расчет нового времени пребывания в соответствии с распределением:

$$p_n(\tau) = \left(\frac{n}{\theta}\right)^n \frac{\tau^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\tau/\theta}, \quad (9)$$

где θ – среднее время нахождения реакционной смеси в реакторе каскада; τ – вероятностное время пребывания в реакторе; n – количество реакторов каскада. Поскольку начальные условия ведения процесса определяют массовую нагрузку и количество реакторов каскада, то в зависимости от объема реактора V время пребывания реакционной массы в нем может быть разным и определяется исходя из отношения $\theta = V / C_f$ (C_f – объемная скорость потока).

Чаще всего реализация статистического подхода необходима для оценки распределения получаемого продукта по массе и составу образуемых макромолекул. Применительно к процессам сополимеризации интересен анализ структуры молекулярных звеньев продукта [40], определяющий долю различного типа гомодиад в общем составе.

Этап 6. Воспроизведение молекулярно-массового распределения в рамках реализации статистического подхода позволяет избежать применения модельных функций и использования допущений

при математическом описании процесса. Для оценки молекулярно-массового распределения продукта разработана методика, в основе которой лежит цифровая имитация процедуры фракционирования макромолекул полимера. Основная ее идея заключается в том, что в результате моделирования элементарных реакций происходит формирование массивов активных $P[i]$ и неактивных $Q[i]$ макромолекул, анализ которых позволяет проводить одновременный расчет и фиксацию молекулярной массы $massQ[i]$ каждой такой макромолекулы. Для этого численно разбиваем данные значения на группы (или фракции) $fract[i]$ с заданным шагом фракционирования ΔW исходя из условий

$$0 \leq \sum_i massQ[i] < \Delta W \rightarrow fract[1] = \sum_i massQ[i],$$

$$\Delta W \leq \sum_i massQ[i] < 2 \cdot \Delta W \rightarrow fract[2] = \sum_i massQ[i],$$

$$2 \cdot \Delta W \leq \sum_i massQ[i] < 3 \cdot \Delta W \rightarrow fract[3] = \sum_i massQ[i], \dots$$

Для каждой образованной группы вычисляем сумму фракции и рассчитываем ее массовую долю $fractW[i] = fract[i] / \sum_i fract[i]$.

Для окончательной обработки требуется произвести лишь нормализацию полученных значений, поделив ее на шаг фракционирования.

С целью математического описания механизма многоточечной подачи регулятора формируется множество $R = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$, которое численно определяет объем очередной дозировки соответствующих примесей в каждый реактор каскада с номером k . Очевидно,

что $r_1 + r_2 + \dots + r_N = [S]$, а начальные условия определяются исходя из $S_0 = r_1$. При решении системы нелинейных алгебраических уравнений для каждого k -го реактора каскада требуется увеличивать концентрацию регулятора на величину r_k , т. е. $[S]_k = [S]_{k-1} + r_k$.

Таким образом, представленная методология решения прямых задач позволяет на основе математических моделей химической кинетики осуществлять контроль качественных показателей получаемого продукта для различных исходных условий ведения процесса и технологических аспектов организации непрерывного производства. Обоснованный выбор подхода к исследованию процессов определяется масштабом проводимого исследования и поставленными задачами. Реализация основных этапов моделирования

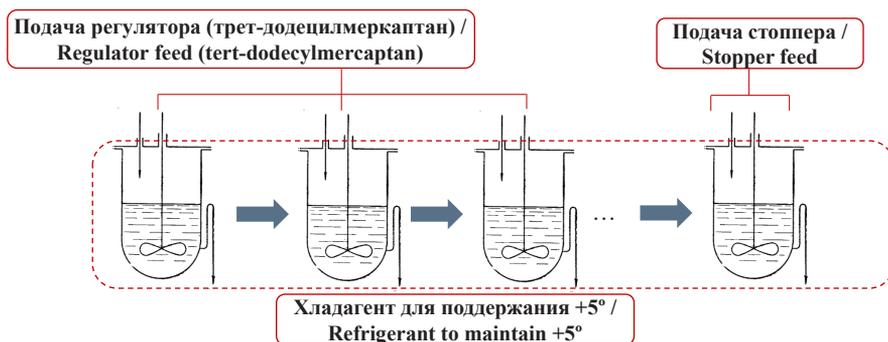
процесса определяет методологическое наполнение соответствующих алгоритмов решения задач эмпирической оценки и схематично представлена на рисунке 1.

Результаты исследования

Апробация созданной методологии осуществлялась на реальном производстве. Соотношение бутадиена со стиролом в мономерной фазе по массовым частям составляет 70:30. Для регулирования молекулярной массы применяется трет-додецилный меркаптан, многоточечная подача которого возможна в соответствии с аппаратурным оформлением производства (рис. 2). Массовое соотношение воды к мономерам составляет 220:100. Для прекращения роста конверсии в качестве стоппера применяется диэтилгидроксиламин, который аппаратно вводится в конечный полимеризатор батареи.



Р и с. 1. Методология решения задач исследования процессов синтеза полимеров
 F i g. 1. Methodology for solving problems of process research polymer synthesis



Р и с. 2. Схема непрерывного производства синтетического каучука путем эмульсионной сополимеризации бутадиена со стиролом

F i g. 2. Scheme of continuous production of synthetic rubber by emulsion copolymerization of butadiene with styrene

Механизм ведения процесса в условиях двухточечного регулирования предполагает использование 9 реакторов каскада при массовой нагрузке 2,75 т/ч, подача регулятора (трет-додецил меркаптана) осуществляется в две точки в соотношении 0,08 мас.ч. в 1 полимеризатор и 0,025 мас. ч. в 5 полимеризатор. В качестве инициатора процесса используется гидроперекись пинана с дозировкой 0,053 мас. ч. Для заданных условий регулирования исходный вектор R , определяющий механизм двухточечного регулирования, содержит следующие значения множества $\{0,08; 0; 0; 0; 0,025; 0; 0; 0; 0\}$.

В частности, для реализации статистического подхода к решению прямой задачи исходя из заданной концентрации реагентов был определен ансамбль макромолекул: бутадиен – $8,6 \cdot 10^5$, стирол – $1,9 \cdot 10^5$, инициатор – 200, регулятор (1 точка) – 260, регулятор (2 точка) – 80 молекул.

В условиях трехточечного регулирования потребуется 11 реакторов каскада при массовой нагрузке 3,5 т/ч по мономерам, регулятор (трет-додецил меркаптан) при этом подается в три точки в соотношении 0,125 мас. ч. в 1 полимеризатор и по 0,027 мас. ч. в 4 и 7 полимеризаторы. Для новых условий подачи регулятора исходный вектор R примет вид $\{0,125; 0; 0; 0; 0,027; 0; 0; 0; 0,027; 0; 0; 0; 0\}$.

Для оценки адекватности полученных расчетных результатов из каждого полимеризатора проводился отбор продукта в емкость со стоппером, который дегазировался от бутадиена, а получаемый в результате коагуляции каучук (сополимер) сушился и анализировался на такие показатели, как конверсия, массовое содержание мономеров и молекулярные характеристики в центральной заводской лаборатории предприятия ОАО «Синтез-Каучук» (Республика Башкортостан), предоставившего все необходимые экспериментальные данные. Результаты проведенных исследований для условий двухточечного регулирования производства приведены в таблице.

В рамках организации вычислительных экспериментов в соответствии с методологией, расчетным путем были получены зависимости конверсии и характеристической вязкости от номера полимеризатора (рис. 3, 4). При этом использовалась зависимость значений характеристической вязкости от значений среднemasовой молекулярной массы в соответствии с выражением Марка – Куна – Хаувинка, коэффициенты которого эмпирическим путем были определены в работе [41]:

$$[\eta] = 5,4 \cdot 10^{-4} M_{\eta}^{0,66}, M_{\eta} = \frac{1,85}{2} M_w. \quad (10)$$

Результаты проведенных экспериментов

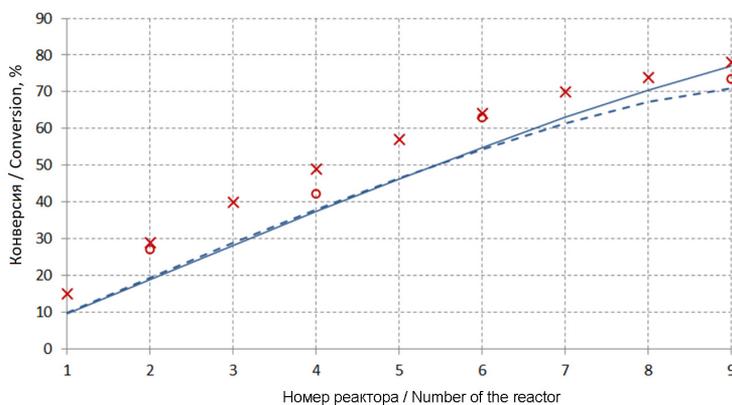
The results of the experiments

Номер полимеризатора по ходу процесса / Number of the polymerizer during the process	Конверсия мономеров по сухому остатку латекса, % / Monomer conversion by latex dry residue, %	Характеристическая вязкость, $[\eta]$ / Characteristic viscosity, $[\eta]$
2	27,0	0,86
3	–	1,28
4	42,0	1,94
5	–	1,77
6	63,0	2,13
7	–	2,16
9	73,3	2,57

Благодаря возможности имитации модельного времени, т. е. времени ведения эксперимента, можем наблюдать 2 серии кривых (после 15 и после 30 часов моделирования процесса). Очевидно, что 15 часов (штриховая линия) недостаточно для получения качественных расчетных результатов, в то время как 30 часов (сплошная линия) моделирования достаточно для стабилизации получаемых характеристик, которые можно рассматривать как значения, характерные для статических режимов непрерывного

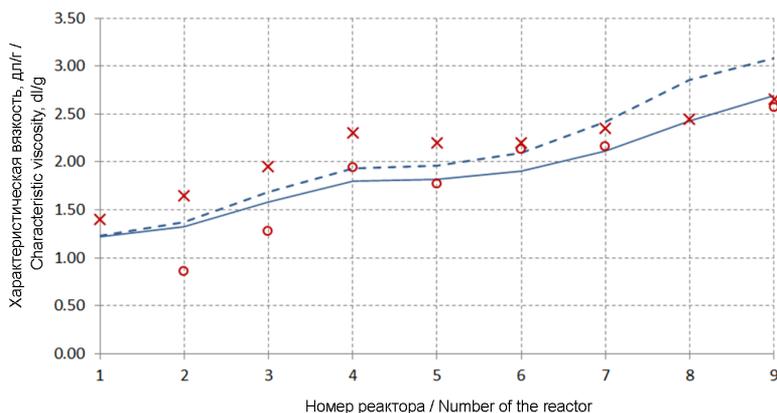
производства. Добавление второй порции регулятора в 5 полимеризатор приводит к снижению значений характеристической вязкости, конверсионная зависимость при этом не меняется.

Проведение вычислительного эксперимента для условий трехточечного регулирования позволило также добиться соответствия расчетных и экспериментальных данных. Вызывают интерес сравнение кривых, характеризующих распределение макромолекул по массе, полученные в рамках реализации



Р и с. 3. Изменение конверсии мономеров от номера полимеризатора (° – экспериментальные точки, x – результаты кинетического подхода; штриховая и сплошная линия – результаты статистического подхода после 15 и 30 часов ведения процесса)

F i g. 3. Change in the conversion of monomers from the polymerizer number (° – experimental points, x – results of the kinetic approach; dashed and solid lines are the results of the statistical approach after 15 and 30 hours of the process)



Р и с. 4. Изменение характеристической вязкости от номера полимеризатора (° – экспериментальные точки; x – результаты кинетического подхода; штриховая и сплошная линия – результаты статистического подхода после 15 и 30 часов ведения процесса)

Fig. 4. Change in intrinsic viscosity versus polymerizer number (° – experimental points; x – results of the kinetic approach; dashed and solid lines are the results of the statistical approach after 15 and 30 hours of the process)

статистического подхода согласно этапам 4–6. На рисунке 5 представлена визуализация дифференциальной кривой молекулярно-массового распределения для условий двухточечной и трехточечной подачи регулятора. Анализ кривых позволяет сделать вывод о том, что добавление третьей точки подачи регулятора способствует снижению среднemasовой молекулярной массы сополимера, при этом распределение характеризуется увеличением доли низкомолекулярных фракций и уменьшением доли высокомолекулярных фракций.

В проведенном анализе микроструктуры (рис. 6) наблюдается рост доли гомоциклов бутадиен-бутадиен (BB) и соответствующее уменьшение доли гомоциклов стирол-стирол (SS), что предопределяет снижение жесткости и соответственно увеличение показателей эластичности продукта.

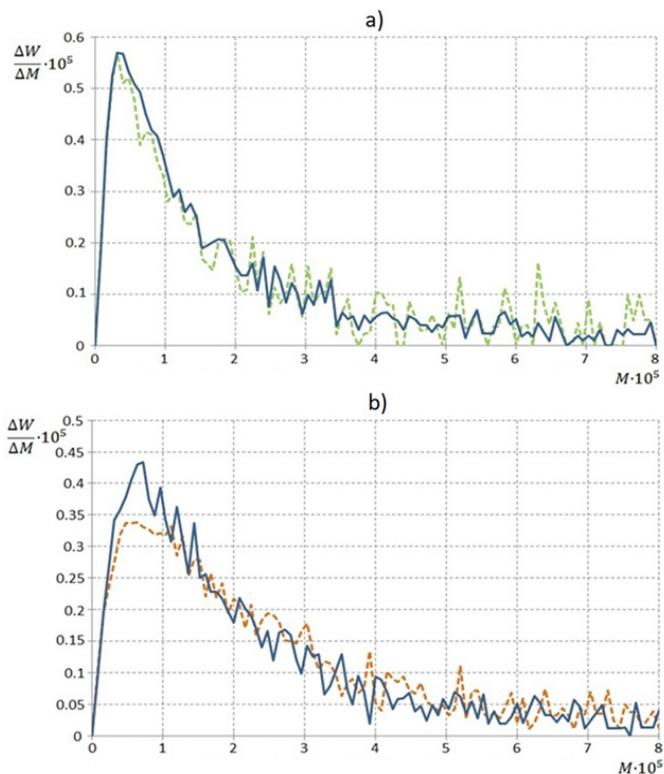
Обсуждение и заключение

Представленная в работе методология исследования процессов синтеза полимеров позволяет на основе математических моделей химической кинетики осуществлять контроль физико-химических и потребительских параметров

производимого продукта для различных исходных условий ведения процесса и технологических аспектов непрерывного производства. Программная реализация описанной методологии [42] и вычислительные эксперименты позволили решить задачу оценки влияния технологии многоточечного регулирования в промышленном производстве синтетического каучука.

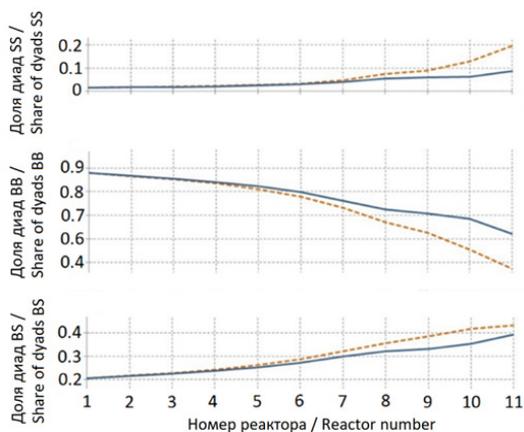
В частности, для процесса сополимеризации бутадиена со стиролом вычислительные эксперименты позволили оценить влияние трехточечного регулирования молекулярной массы с применением тред-додецил меркаптана. Добавление третьей точки регулирования процесса позволило снизить значение среднemasовой молекулярной массы получаемого продукта, анализ молекулярно-массового распределения при этом показал увеличение доли низкомолекулярных фракций и уменьшение доли высокомолекулярных фракций.

Проведенный анализ структуры молекулярных звеньев в свою очередь характеризует снижение жесткости и увеличение эластичности получаемого продукта, а созданные инструменты



Р и с. 5. Дифференциальная кривая ММР для условий:
а) двухточечного; б) трехточечного регулирования

Fig. 5. Differential MWD curve for conditions: a) two-point; b) three-point regulation



Р и с. 6. Зависимость значений доли гомодиад стирол-стирол (SS), бутадиен-бутадиен (BB), бутадиен-стирол (BS) в цепях сополимера от номера полимеризатора (пунктир – двухточечный режим, сплошная линия – трехточечный режим подачи регулятора)

Fig. 6. Dependence of the proportion of homodiads styrene-styrene (SS), butadiene-butadiene (BB), butadiene-styrene (BS) in the copolymer chains on the polymerizer number (dotted line – two-point mode, solid line – three-point mode of supply of the regulator)

оценки данного влияния позволяют путем организации многочисленных вычислительных экспериментов подбирать оптимальные параметры регулирования

процессом промышленного синтеза полимерной продукции и решать перспективные задачи планирования производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. А., Насыров И. Ш. Отечественные промышленные стереорегулярные каучуки. Исследования и разработки. Уфа, 2018. 288 с.
2. Куперман Ф. Е. Новые каучуки для шин. Натуральный каучук. Синтетические стереорегулярные изопреновые и бутадиеновые каучуки. Структура, свойства, применение. М. : НТЦ «НИИШП», 2009. 606 с.
3. Способ получения цис-1,4-полиизопрена: патент 2539655 Российская Федерация / Баженов Ю. П. [и др.] № 2013135569/04 ; заявл. 29.07.2013 ; опубл. 20.01.2015, Бюл. № 2.
4. Göttker-Schnetmann I., Kenyon P., Mecking S. Coordinative Chain Transfer Polymerization of Butadiene with Functionalized Aluminum Reagents // *Angewandte Chemie International Edition*. 2019. Vol. 58, issue 49. P. 17777–17781. <https://doi.org/10.1002/anie.201909843>
5. Molar Mass Control by Diethyl Zinc in the Polymerization of Butadiene Initiated by the Ternary Catalyst System Neodymium Versatate/Disobutylaluminum Hydride/Ethylaluminum Sesquichloride / L. Friebe [et al.] // *Journal of Macromolecular Science, Part A*. 2007. Vol. 43, issue 1. P. 11–22. <https://doi.org/10.1080/10601320500405786>
6. Greene P. *Automotive Plastics and Composites*. William Andrew Publishing, 2021. 380 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.00009-X>
7. Determination of the Intrinsic Viscosity and Molecular Weight of Poly (Methyl Methacrylate) Blends / Y. Yigit [et al.] // *Journal of Investigations on Engineering & Technology*. 2019. Vol. 2, issue 2. P. 34–39.
8. Подвальный С. Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации. М. : Химия, 1979. 350 с.
9. Берлин А. А., Вольфсон С. А. Кинетический метод в синтезе полимеров. М. : Химия, 1973. 344 с.
10. Monte Carlo Simulation of Surface-Initiated Polymerization: Heterogeneous Reaction Environment / B. Yang [et al.] // *Macromolecules*. 2022. Vol. 55, issue 6. P. 1970–1980. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c02575>
11. Initiator Feeding Policies in Semi-Batch Free Radical Polymerization: A Monte Carlo Study / A. Seyedi [et al.] // *Processes*. 2020. Vol. 8. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/pr8101291>
12. Усманов Т. С., Спивак С. И., Усманов С. М. Обратные задачи формирования молекулярно-массовых распределений. М. : Химия, 2004. 252 с.
13. Монаков Ю. Б., Марина Н. Г., Сабиров З. М. Полимеризация диенов в присутствии лантаноидсодержащих катализаторов // *Высокомолекулярные соединения*. 1994. Т. 36, № 10. С. 1680–1697.
14. Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Дранишников Л. В. Системный анализ процессов химической технологии. М. : Наука., 1991. 350 с.
15. Семчиков Ю. Д. *Высокомолекулярные соединения*. М. : Академия, 2003. 368 с.
16. Asteasuain M. Efficient Modeling of Distributions of Polymer Properties Using Probability Generating Functions and Parallel Computing // *Computers & Chemical Engineering*. 2019. Vol. 128. P. 261–284. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.06.009>
17. Nelson A., Keener J., Fogelson A. Kinetic Model of Two-Monomer Polymerization. 2020. Vol. 101, issue 2. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.101.022501>
18. Кирпичников П. А., Береснев В. В., Попова Л. М. Альбом технологических схем основных производств промышленности синтетического каучука. Л. : Химия., 1986. 224 с.
19. Арис Р. Анализ процессов в химических реакторах. Л. : Химия, 1989. 327 с.
20. Берлин А. А., Вольфсон С. А., Ениколопян Н. С. Кинетика полимеризационных процессов. М. : Химия, 1978. 320 с.
21. Подвальный С. Л., Барабанов А. В. Структурно-молекулярное моделирование непрерывных технологических процессов многоцентральной полимеризации. Воронеж : Научная книга, 2011. 104 с.

22. Modeling of a Continuous Process of Isoprene Polymerization in the Presence of Titanium-based Catalyst Systems Under Polycentric Conditions / E. Miftakhov // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1479. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012072>
23. Trigilio A., Marien Y., Van Steenberge P., D'hooge D. Gillespie-Driven kinetic Monte Carlo Algorithms to Model Events for Bulk or Solution (Bio)Chemical Systems Containing Elemental and Distributed Species // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. Vol. 59, issue 41. P. 18357–18386. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c03888>
24. Rawlings J. B., Ekerdt J. G. Chemical Reactor Analysis and Design Fundamentals. Madison : Nob Hill Publishing, 2002. 610 p.
25. About an Algorithm for Modeling the Isoprene Polymerization Process in the Cascade of Reactors Using the Monte Carlo method / T. A. Mikhailova [et al.] // Journal of Physics. 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1745/1/012079>
26. Mavrantzas V. Using Monte Carlo to Simulate Complex Polymer Systems: Recent Progress and Outlook // Frontiers in Physics. 2021. P. 1–19. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.661367>
27. Carlo Algorithm based on Internal Bridging Moves for the Atomistic Simulation of Thiophene Oligomers and Polymers / F. Tsourtou [et al.] // Macromolecules. 2018. Vol. 51, issue 21. P. 8406–8423. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b01344>
28. Dynamic Monte Carlo Simulations of Effects of Nanoparticle on Polymer Crystallization in Polymer Solutions / Z. Gu [et al.] // Computational Materials Science. 2018 Vol. 147. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.02.009>
29. Шакирьянов Э. Д., Бодулев А. В., Усманов С. М. Компьютерное моделирование реакционных процессов полифункциональных мономеров и олигомеров // Обратные задачи и математические модели. Сб. научных трудов. Бирский филиал Башкирского государственного университета. 2021. С. 5–14.
30. Янборисов В. М., Козлов В. Г. Моделирование полимеризации изопрена в присутствии каталитической системы TiCl₄-TBuCl методом Монте-Карло // Вестник Башкирского университета. 2021. Т. 26, № 1. С. 52–57. <https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2021.1.9>
31. Monte Carlo Method for Modelling the Copolymerization of Isobutylene and Isoprene / I. O. Antonova [et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021 (052062). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052062>
32. Янборисов В. М., Султанова А. А., Колесов С. В. Инверсный алгоритм моделирования радикальной полимеризации методом Монте-Карло // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 4. С. 3–15.
33. Иржак В. И. Архитектура полимеров. М. : Наука, 2012. 368 с.
34. Иржак В. И. Топологическая структура полимеров. Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. 520 с.
35. Иржак Т. Ф., Иржак В. И. Концепция блоков связей в теории сополиконденсации // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 1997. Т. 39, № 12. С. 2011–2016.
36. Дебердеев Т. Р., Иржак В. И., Гарипов Р. М. Концепция блоков связей как инструмент адекватного прогнозирования топологической структуры модифицированных эпоксиаминных матриц // Вестник технологического университета. 2010. Т. 5. С. 122–135.
37. Modified Concept of Bond Blocks and its Applications / K. A. Tereshchenko [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 433, issue 2. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133537>
38. Assessing the Hydrodynamic Effect on the Molecular Parameters of the Isoprene Polymerization Product in the Presence of a Neodymium-Based Catalytic System / S. Mustafina [et al.] // ACS Omega. 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00469>
39. «IsopreneMonoMCM» для моделирования периодического процесса полимеризации изопрена в присутствии моноцентровой каталитической системы методом Монте-Карло: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Михайлова Т. А. [и др.] № 2020667314 ; заявл. 23.12.2020 ; опубл. 12.01.2021.
40. Михайлова Т. А., Мифтахов Э. Н., Мустафина С. А. Компьютерное моделирование производства бутадиен-стирольного каучука в каскаде реакторов методом Монте-Карло // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 4 (66). С. 64–69.
41. Бартнев Г. М., Френкель С. Я. Физика полимеров. Л. : Химия, 1990. 432 с.
42. Developing Methods and Algorithms for Cloud Computing Management Systems in Industrial Polymer Synthesis Processes / E. Miftakhov [et al.] // Emerging Science Journal. 2021. Vol. 5, issue 6. P. 964–972. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-01324>

Поступила 24.03.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023; принята к публикации 17.05.2023

Об авторах:

Мифтахов Эльдар Наилевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-5949>, Scopus ID: 56178153800, promif@mail.ru

Мустафина Светлана Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой математического моделирования Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6363-1665>, Scopus ID: 6603592002, mustafina_sa@mail.ru

Насыров Ильдус Шайхитдинович, кандидат химических наук, заместитель генерального директора по развитию (по науке) Акционерного общества «Синтез-Каучук» (453110, Российская Федерация, г. Стерлитамак, ул. Техническая, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8273-3651>, Scopus ID: 6603373003, nasyrovish@mail.ru

Морозкин Николай Данилович, доктор физико-математических наук, профессор, президент Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5051-7094>, Scopus ID: 6603118906, morozkinnd@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Э. Н. Мифтахов – разработка методов и алгоритмов решения прямых задач; проведение вычислительных экспериментов; подготовка текста статьи.

С. А. Мустафина – постановка цели и задачи исследования; планирование необходимых вычислительных экспериментов; анализ получаемых результатов.

И. Ш. Насыров – планирование и организация необходимых лабораторных экспериментов.

Н. Д. Морозкин – анализ получаемых результатов исследования; обзор литературных источников.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Vasiliev V.A., Nasyrov I.Sh. [Domestic Industrial Stereoregular Rubbers. Research and Development]. Ufa; 2018. (In Russ.)
2. Kuperman F.E. [New Rubbers for Tires. Natural Rubber. Synthetic Stereoregular Isoprene and Butadiene Rubbers. Structure, Properties, Application]. Moscow: NTC "NIIShP"; 2009. (In Russ.)
3. Bazhenov Yu.P., Zhavoronkov D.A., Nasyrov I.Sh., Petrunina A.V., Faizova V.Yu. [Method for Obtaining cis-1,4-polyisoprene: Patent 2539655 Russian Federation] / No. 2013135569/04; app. 29.07.2013; publ. 20.01.2015, bull. No. 2. 8 p. (In Russ.)
4. Göttker-Schnetmann I., Kenyon P., Mecking S. Coordinative Chain Transfer Polymerization of Butadiene with Functionalized Aluminum Reagents. *Angewandte Chemie International Edition*. 2019;58(49):17777–17781. <https://doi.org/10.1002/anie.201909843>
5. Friebe L., Müller J.M., Nuyken O., Obrecht W. Molar Mass Control by Diethyl Zinc in the Polymerization of Butadiene Initiated by the Ternary Catalyst System Neodymium Versatate/Diisobutylaluminum Hydride/Ethylaluminum Sesquichloride. *Journal of Macromolecular Science. Part A*. 2007;43(1):11–22. <https://doi.org/10.1080/10601320500405786>
6. Greene P. Automotive Plastics and Composites. William Andrew Publishing; 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.00009-X>
7. Yigit Y., Kilislioglu A., Karakus S., Baydogan N. Determination of the Intrinsic Viscosity and Molecular Weight of Poly (Methyl Methacrylate) Blends. *Journal of Investigations on Engineering & Technology*. 2019;2(2):34–39.
8. Podvalny S.L. [Modeling of Industrial Processes of Polymerization]. Moscow: Chemistry; 1979. (In Russ.)
9. Berlin A.A., Wolfson S.A. [Kinetic Method in the Synthesis of Polymers]. Moscow: Chemistry; 1973. (In Russ.)
10. Yang B., Liu S., Ma J., Yang Y., Li J., Jiang B., et al. Monte Carlo Simulation of Surface-Initiated Polymerization: Heterogeneous Reaction Environment. *Macromolecules*. 2022;55(6):1970–1980. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c02575>

11. Seyedi A., Najafi M., Russell G., Mohammadi Y., Vivaldo-Lima E., Penlidis A. Initiator Feeding Policies in Semi-Batch Free Radical Polymerization: A Monte Carlo Study. *Processes*. 2020;8:1–19. <https://doi.org/10.3390/pr8101291>
12. Usmanov T.S., Spivak S.I., Usmanov S.M. [Inverse Problems of the Formation of Molecular Mass Distributions]. Moscow: Chemistry; 2004. (In Russ.)
13. Monakov Yu.B., Marina N.G., Sabirov Z.M. Polymerization of Dienes in the Presence of Lanthanide-Containing Catalysts. *Vysokomolekular. Connections*. 1994;36(10):1680–1697. (In Russ.)
14. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Dranishnikov L.V. [System Analysis of Chemical Technology Processes]. Moscow: Nauka; 1991. (In Russ.)
15. Semchikov Yu.D. [High-Molecular Compounds]. Moscow: Academy; 2003. (In Russ.)
16. Asteasuain M. Efficient Modeling of Distributions of Polymer Properties Using Probability Generating Functions and Parallel Computing. *Computers & Chemical Engineering*. 2019;128:261–284. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.06.009>
17. Nelson A., Keener J., Fogelson A. Kinetic Model of Two-Monomer Polymerization. 2020;101(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.101.022501>
18. Kirpichnikov P.A., Beresnev V.V., Popova L.M. [Album of Technological Schemes of the Main Productions of the Synthetic Rubber Industry]. Leningrad: Chemistry; 1986. (In Russ.)
19. Aris R. [Analysis of Processes in Chemical Reactors]. Leningrad: Chemistry; 1989. (In Russ.)
20. Berlin A.A., Wolfson S.A., Enikolopyan N.S. [Kinetics of Polymerization Processes]. Moscow: Chemistry; 1978. (In Russ.)
21. Podvalnyy S.L., Barabanov A.V. [Structural and Molecular Modeling of Continuous Technological Processes of Multicenter Polymerization]. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2011. (In Russ.)
22. Miftakhov E., Mustafina S., Petrenko V., Podvalnii E. Modeling of a Continuous Process of Isoprene Polymerization in the Presence of Titanium-Based Catalyst Systems Under Polycentric Conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1479(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012072>
23. Trigilio A., Marien Y., Van Steenberge P., D'hooge D. Gillespie-Driven Kinetic Monte Carlo Algorithms to Model Events for Bulk or Solution (Bio)Chemical Systems Containing Elemental and Distributed Species. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020;59(41):18357–18386. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c03888>
24. Rawlings J.B., Ekerdt J.G. [Chemical Reactor Analysis and Design Fundamentals]. Madison: Nob Hill Publishing; 2002.
25. Mikhailova T.A., Miftakhov, E.N., Mikhailov V.A., Mustafina S.A. About an Algorithm for Modeling the Isoprene Polymerization Process in the Cascade of Reactors Using the Monte Carlo Method. *Journal of Physics*. 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1745/1/012079>
26. Mavrantzas V. Using Monte Carlo to Simulate Complex Polymer Systems: Recent Progress and Outlook. *Frontiers in Physics*. 2021;9:1–19. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.661367>
27. Tsourtou F., Peroukidis S., Peristeras L., Mavrantzas V. Monte Carlo Algorithm Based on Internal Bridging Moves for the Atomistic Simulation of Thiophene Oligomers and Polymers. *Macromolecules*. 2018;51(21):8406–8423. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b01344>
28. Gu Z., Yang R., Yang J., Qiu X., Liu R., Liu Y., et al. Dynamic Monte Carlo Simulations of Effects of Nanoparticle on Polymer Crystallization in Polymer Solutions. *Computational Materials Science*. 2018;147:217–226. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.02.009>
29. Shakiryaynov E.D., Bodulev A.V., Usmanov S.M. Computer Modeling of Reaction Processes of Polyfunctional Monomers and Oligomers. In: Inverse Problems and Mathematical Models. Collection of Scientific Papers. BirsK: BirsK Branch of the Bashkir State University; 2021. p. 5–14. (In Russ.)
30. Yanborisov V.M., Kozlov V.G. Simulation of Isoprene Polymerization in the Presence of the TiCl₄-TBuCl Catalytic System by the Monte Carlo Method. *Bulletin of the Bashkir University*. 2021;26(1):52–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2021.1.9>
31. Antonova I.O., Dmitricheva R.R., Bronskaya V.V., Manuyko G.V., Kharitonova O.S., Balzamor D.S. Monte Carlo Method for Modeling the Copolymerization of Isobutylene and Isoprene. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;052062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052062>
32. Yanborisov V.M., Sultanova A.A., Kolesov S.V. Inverse Algorithm for Modeling Radical Polymerization by the Monte-Carlo Method. *Mathematical Modeling*. 2016;28(4):3–15. (In Russ.)

33. Irzhak V.I. [Polymer Architecture]. Moscow: Nauka; 2012. (In Russ.)
34. Irzhak V.I. [Topological Structure of Polymers]. Kazan: KNITU Publishing House; 2013. (In Russ.)
35. Irzhak T.F., Irzhak V.I. The Concept of Bond Blocks in the Theory of Copolycondensation. *High Molecular Weight Compounds. Series A*. 1997;39(12):2011–2016. (In Russ.)
36. Deberdeev T.R., Irzhak V.I., Garipov R.M. The Concept of Bond Blocks as a Tool for Adequate Prediction of the Topological Structure of Modified Epoxyamine Matrices. *Bulletin of the Technological University*. 2010;5:122–135. (In Russ.)
37. Tereshchenko K.A., Shiyan D.A., Ulitin N.V., Deberdeev R.Y., Kharlampidi K.E., Kolesov S.V. Modified Concept of Bond Blocks and Its Applications. *Chemical Engineering Journal*. 2021;433(2). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133537>
38. Mustafina S., Miftakhov E., Akimov A., Podvalny S., Gabelashvili K. Assessing the Hydrodynamic Effect on the Molecular Parameters of the Isoprene Polymerization Product in the Presence of a Neodymium-Based Catalytic System. *ACS Omega*. 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00469>
39. Mikhailova T.A., Miftakhov E.N., Mikhailov V.A., Mustafina S.A. For Modeling the Periodic Process of Polymerization of Isoprene in the Presence of a Monocenter Catalytic System by the Monte Carlo Method: Certificate of State Registration of the Computer Program. No. 2020667314; app. 23.12.2020; publ. 12.01.2021. (In Russ.)
40. Mikhailova T.A., Miftakhov E.N., Mustafina S.A. Computer Simulation of the Production of Styrene-Butadiene Rubber in a Cascade of Reactors by the Monte Carlo Method. *Control Systems and Information Technologies*. 2016;(4):64–69. (In Russ.)
41. Bartenev G.M., Frenkel S.Ya. [Physics of Polymers]. Leningrad: Chemistry; 1990. (In Russ.)
42. Miftakhov E., Mustafina S., Akimov A., Larin O., Gorlov A. Developing Methods and Algorithms for Cloud Computing Management Systems in Industrial Polymer Synthesis Processes. *Emerging Science Journal*. 2021;5(6):964–972. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-01324>

Submitted 24.03.2023; revised 02.05.2023; accepted 17.05.2023

About the authors:

Eldar N. Miftakhov, Cand.Sci. (Phis.-Math.), Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-5949>, Scopus ID: 56178153800, promif@mail.ru

Svetlana A. Mustafina, Dr.Sci. (Phis.-Math.), Professor, Vice-Rector for Research, Head of Chair of Mathematical Modeling, Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6363-1665>, Scopus ID: 6603592002, mustafina_sa@mail.ru

Ildus Sh. Nasyrov, Cand.Sci. (Phis.-Math.), Deputy General Director for Development (for Science), Joint Stock Company Sintez-Kauchuk (14 Tekhnicheskaya St., Sterlitamak 453110, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8273-3651>, Scopus ID: 6603373003, nasyrovish@mail.ru

Nikolay D. Morozkin, Dr.Sci. (Phis.-Math.), Professor, President of the Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5051-7094>, Scopus ID: 6603118906, morozkinnd@mail.ru

Authors Contribution:

E. N. Miftakhov – development of methods and algorithms for solving direct problems; conducting computational experiments, preparing the text of the article.

S. A. Mustafina – setting the goal and objectives of the study; planning the necessary computational experiments; analysis of the results.

I. Sh. Nasyrov – planning and organization of the laboratory experiments.

N. D. Morozkin – analysis of the results of the study; literature review.

All authors have read and approved the final manuscript.

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)

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 CrossCheck.

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.

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 ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. 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.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *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 ВОАI 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.

Гордина Светлана Викторовна – 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

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 CrossCheck systems.

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.

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 given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. 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.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

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.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *У. А. Сновальникова*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 23.06.2023 г. Дата выхода в свет 30.06.2023 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$, Усл. печ. л. 12,02.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 514. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»)



Editor *U. A. Snovalnikova*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 23.06.2023. Date of publishing 30.06.2023.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 12.02.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 100 copies. Order no. 514. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)