

doi: 10.15507/2658-4123.033.202301

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

Том 33, № 1. 2023

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

16+



Vol. 33, no. 1. 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 Цзянзуского 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

Тарасенко Б. Ф., Кузьмин В. В., Трояновская И. П., Партко С. А., Войнаш С. А. Борона с поворотной дисковой секцией	10
Несмиян А. Ю., Дубина К. П., Жигайлова А. П. Влияние диаметра присасывающих отверстий аппарата точного высева на характеристики подачи семян кукурузы и подсолнечника	21
Алешкин А. В., Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Низовцев С. Л. Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна	37
Милюткин В. А., Овчинников В. А. Повышение урожайности и качества зерна озимой пшеницы за счет применения инновационных удобрений и сельхозмашин	52

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Левцев А. П., Лапин Е. С., Чжень Д. Использование тарельчатых диафрагм транспортных средств в двухконтурных мембранных насосах	68
Величко С. А., Мартынов А. В., Мартынова Е. Г. Оценка триботехнических свойств консолидированных материалов, полученных методом электронской обработки	79
Плотников С. А., Карташевич А. Н., Заболотских Г. Э. Исследование составов и способов подачи новых топлив с добавками сурепного масла в дизель	100

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Просвирякова М. В., Сторчевой В. Ф., Горячева Н. Г., Михайлова О. В., Новикова Г. В., Сторчевой А. В. Сверхвысокочастотная хмелесушилка с поярусно расположенными резонаторами	114
Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Процессы адресной доставки энергии и тепломассопереноса в системах с нано-, микро- и макроэлементами	128
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.)</i>	140
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.)</i>	142

CONTENTS

AGRICULTURAL ENGINEERING

Tarasenko B. F., Kuzmin V. V., Troyanovskaya I. P., Partko S. A., Voinash S. A. Harrow with Turning Disc Section.....	10
Nesmiyan A. Yu., Dubina K. P., Zhigailova A. P. Influence of Suction Hole Diameter of Precision Seed Machine on the Characteristics of Feeding Corn and Sunflower Seeds.....	21
Aleshkin A. V., Bulatov S. Yu., Nechaev V. N., Nizovtsev S. L. Substantiation of the Structural and Technological Parameters of the Working Body of the Milling Grain Shredder.....	37
Milyutkin V. A., Ovchinnikov V. A. Increasing the Yield and Quality of Winter Wheat Grain through the Use of Innovative Fertilizers and Agricultural Machinery	52

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Levtsev A. P., Lapin E. S., Chen D. The Use of Disk-Shaped Diaphragm of Vehicles in Double-Circuit Diaphragm Pumps	68
Velichko S. A., Martynov A. V., Martynova E. G. Assessment of Tribotechnical Properties of Consolidated Materials Obtained by Electrospark Processing.....	79
Plotnikov S. A., Kartashevich A. N., Zabolotskikh G. E. The Study of Compositions and Methods of Supplying New Fuels with Additives of Brassica Rapa Oil to the Diesel.....	100

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Prosviryakova M. V., Storchevoy V. F., Goryacheva N. G., Mikhaylova O. V., Novikova G. V., Stotrchevoy A. V. Ultrahigh-Frequency Hop Dryer with Tiered Resonators	114
Gavrilov A. V., Gerber Yu. B. Targeted Energy Delivery and Heat-Mass Transfer Processes in Systems with Nano-, Micro-, and Macroelements	128
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	140
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	142

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.313.6

doi: [10.15507/2658-4123.033.202301.010-020](https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.010-020)

Original article



Harrow with Turning Disc Section

B. F. Tarasenko^a, V. V. Kuzmin^a, I. P. Troyanovskaya^{b, c} ✉,
S. A. Partko^d, S. A. Voinash^e

^a Kuban State Agrarian University (Krasnodar, Russian Federation)

^b South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

^c South Ural State Agrarian University (Troitsk, Russian Federation)

^d Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

^e Kazan Federal University (Kazan, Russian Federation)

✉ tripav63@mail.ru

Abstract

Introduction. At present, there is widely used smooth plowing, which is moldboard plowing without back ridges and deep furrows.

Aim of the Article. The article deals with developing a new design of working tools for smooth soil plowing that ensure the fulfillment of the required quality of soil cultivation. **Materials and Methods.** Based on the analysis of existing designs, the authors developed a harrow with a turning disc section, which is characterized by increased operational reliability by reducing energy costs for its adjustment. The range of change in the approach angle of the disk working bodies is 5–45°.

Results. It was found that the speed of movement and the inclination angle disks have the greatest influence on the tillage quality. To optimize the motion parameters with a turning disc section for the best smooth plowing quality, a two-factor experiment was carried out.

Discussion and Conclusion. As a result, it was found that at a speed of 9.113 km/h and approach angle of working disks of 32°, the quality of tillage is maximum and amounts to 86.1%.

Keywords: smooth plowing, disc harrow, angle of attack disks, two-factor experiment, response surface, optimization problem

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

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

For citation: Tarasenko B.F., Kuzmin V.V., Troyanovskaya I.P., et al. Harrow with Turning Disc Section. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):10–20. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.010-020>

© Tarasenko B. F., Kuzmin V. V., Troyanovskaya I. P., Partko S. A., Voinash S. A., 2023



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

Борона с поворотной дисковой секцией

Б. Ф. Тарасенко¹, В. В. Кузьмин¹, И. П. Трояновская^{2,3}✉,
С. А. Партко⁴, С. А. Войнаш⁵

¹ Кубанский государственный аграрный университет
(г. Краснодар, Российская Федерация)

² Южно-Уральский государственный университет
(г. Челябинск, Российская Федерация)

³ Южно-Уральский государственный аграрный университет
(г. Троицк, Российская Федерация)

⁴ Донской государственный технический университет
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

⁵ Казанский федеральный университет
(г. Казань, Российская Федерация)

✉ trpav63@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время широкое распространение получила гладкая вспашка, представляющая собой отвальную обработку почвы без свальных гребней и глубоких борозд.

Цель статьи. Цель исследования – разработка новой конструкции рабочих органов для гладкой вспашки земли, обеспечивающей необходимое качество обработки почвы.

Материалы и методы. На основе анализа существующих конструкций авторы разработали борону с поворотной дисковой секцией, отличающуюся повышенной эксплуатационной надежностью за счет снижения затрат энергии на ее регулировку. Диапазон изменения угла атаки дисковых рабочих органов составляет 5–45°.

Результаты исследования. Выявлено, что наибольшее влияние на качество обработки почвы оказывают скорость движения и угол наклона дисков. Для оптимизации параметров движения с поворотной дисковой секцией, обеспечивающих наилучшее качество гладкой вспашки, был проведен двухфакторный эксперимент.

Обсуждение и заключение. Максимальное качество обработки почвы 86,1 % получено при скорости движения 9,1 км/ч и угле наклона рабочих дисков 32°.

Ключевые слова: гладкая вспашка, дисковая борона, угол наклона дисков, двухфакторный эксперимент, поверхность отклика, задача оптимизации

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Борона с поворотной дисковой секцией / Б. Ф. Тарасенко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 10–20. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.010-020>

Introduction

A high yield of agricultural products largely depends on the moisture-saving and moisture-accumulating properties of the tith top soil [1; 2]. Insufficient moistening of the tith top soil can lead to 30–40% yield loss.

Agricultural engineering

Autumn-winter tillage plays an important role in the process of moisture accumulation in the seed layer [3; 4].

Plowing is the most important agrotechnical method of soil cultivation. It is the most energy-intensive point of soil

preparation for the cultivation of grain crops. Plowing accounts for 30–40% of all agricultural energy consumption costs [5].

An even, well-loosened surface with complete incorporation of crop residues is the main requirement for plowing [6]. Moving the upper tilled top soil layer to the place of the lower one creates good conditions for the growth and development of plants. The yield depends on the incorporation of the fertile top layer to the depth of plowing.

Today, there is no consensus among specialists in the agricultural sector about the need for basic tillage and the preference for one or another method of its implementation.

Until recently, in our country, almost everywhere, moldboard plowing was used as the main one. It ensures the turnover of the soil layer, the crumbling of the soil, and the incorporation of crop residues, organic and mineral fertilizers.

Moldboard plowing is one of the most effective and environmentally friendly ways to control weeds, pests and pathogens. However, moldboard plowing technologies have a number of serious disadvantages. These include a high energy intensity of the process, horizontal displacement and mixing of soil layers, the formation of a “plow sole”, high ridgedness and clodiness of the field surface, especially in dry farming conditions.

The problem is the formation of a treated moisture-saving and moisture-accumulating soil layers in the conditions of insufficient moisture for reducing plant damage from Fusarium disease, due to which crop losses can be from 30 to 40%.

Non-moldboard tillage with chisel tools makes it possible to eliminate a number of these shortcomings and contributes to the accumulation of moisture while maintaining biological balance in the soil layer.

However, the currently existing non-moldboard tillage technologies are

energy- and material-intensive, and need to be improved. Therefore, the development of innovative combined universal tillage products is a topical research area.

Recently, smooth plowing is widely used, which is moldboard tillage without dump ridges and deep furrows [7; 8].

The purpose of further research was to develop a new design of working tools for smooth soil plowing, providing the required quality of tillage, and characterized by increased operational reliability by reducing energy costs for its adjustment.

Literature Review

New technologies contribute to the development of new and continuous improvement of existing working tools of machine and tractor units [9–11]. Reversible plows are currently the most popular (Fig. 1).



Fig. 1. Reversible plow

A reversible plow eliminates unnecessary operations with a soil layer. Each subsequent pass of the plow across the field is carried out very close to the previous one. This reduces the cost of tilling by 10% and improves the conditions for using agricultural machinery for further harvesting.

Reversible plows are equipped with two sets of working bodies with an electromechanical reversing device [12–15]. Reversible plows are characterized by the complexity of the design, increased material consumption (2–3 times higher than traditional plows) and high cost [16]. All this contributed to the development of new technical means for the main tillage.

An alternative to reversible plows are two-row plows [17]. Their metal consumption is 1.5 times less than the metal consumption of reversible plows (Fig. 2).

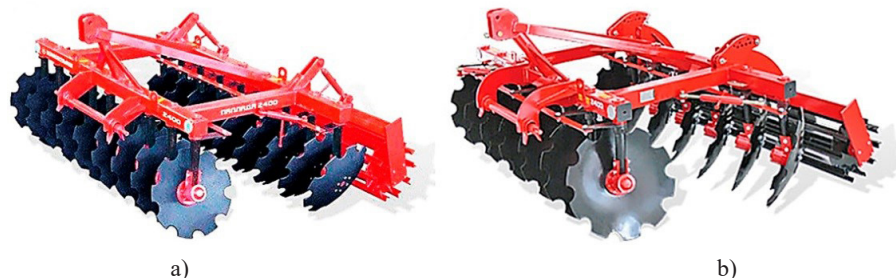


Fig. 2. Double-row harrows with (a) disk working bodies and (b) disk-chisel working bodies

The disc harrow (Fig. 2a) is equipped with two rows of disc harrows [18]. The approach angle of the working tools varies within $0\text{--}30^\circ$ that which allows adjusting the unit for different types of soil. However, this design has a number of disadvantages:

- poor plowing quality (especially of hard clay soils);
- need for frequent maintenance (need for cleaning);
- manual adjustment of the approach angles of the disc working tools (using a wrench).

The chisel-disk harrow is a combined soil-cultivating aggregate (Fig. 2b). It combines the functions of a heavy disc harrow and a chisel plow. This allows increasing the depth of soil tillage from 20 to 40 cm [19–21]. However, shortcomings in the adjustment and maintenance of the harrow remain.

To improve the regulation of the approach angles of discs, a plow with a turning beam was designed [22]. It includes a bar with chisel working elements 1 and a turning block with disk working tools 2 (Fig. 3).

The rectangular welded section of the disk block 2 can move along the arcuate guide 4 with the help of a swing hydraulic cylinder 3. The approach angle of the disks 2 is changed by means of additional rods separately for the right and left rows. This is a single frame design with a width of 2.3 m and a longitudinal dimension of 5.5 m. With a mass of 5 tons, this working tool is capable of working with the Kirovets K-742 (K-744 R4) tractor. The disadvantage of this design is the high time spent on setting up the disk block. To set the approach angle of the discs, it is necessary first to loosen the fastening of the cutting tools to the turning bar, and after adjusting to tighten them until they stop.

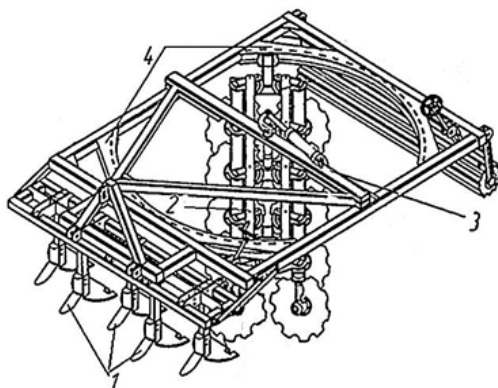


Fig. 3. Plow with swivel beam [22]

Materials and Methods

Object of research

To achieve this goal, the authors developed a harrow design with a turning disc section (Fig. 4).

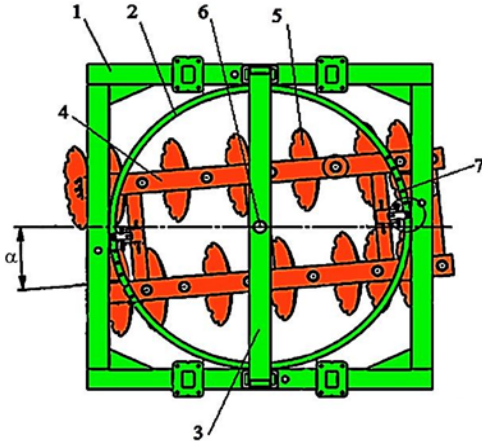


Fig. 4. Harrow with a turning disc section [23]

It is a hinged connection of two sections: a fixed (green) and a movable turning (red). The fixed section is made in the form of a welded square frame 1 with a guide ring 2 and a middle beam 3. The movable rotary section is made in the form of a rectangular frame 4, on the side beams of which racks with cutting discs 5 are rigidly fixed in a staggered manner 5. Initially, the working discs 5 are installed perpendicular to the beams of the movable frame 4. When the beam frame rotates, the approach angle changes $\alpha = 15; 30; 45^\circ$. The inclination angle of the discs to the soil (the angle of obstruction) was 70° .

The movable frame rotates relative to the central kingpin 6 of the fixed section by an angle α . The cutting disks 5 fixed on the frame 4 rotate at the same angle α relative to the fixed frame 1. The rigid fastening of the disks on the movable frame eliminates the use of wrenches and simplifies the procedure for adjusting the approach angle of the cutting disks.

The rotary section is adjusted in a raised transport position. The approach angle α of the movable section is fixed with the help of thrust pins 7, symmetrically welded on two opposite sides of the ring 2. Additional fixation with a cotter pin is provided. The frequency of placement of thrust pins 7 is equal to five degrees (Fig. 5).

When the harrow moves, the discs 5 begin to rotate, due to which the soil is loosened and the roots of plants are cut. The combination with a chisel plow and a packer roller contributes to the required quality of the soil loosening.

The developed design of the harrow with a rotary section makes it easy to set approach angles from 5 to 45° [23]. The choice of the best adjustment depends on the soil resistance.

Optimization of the harrow operating modes

Field tests were carried out on the territory of the Krasnoarmeysky Rice Breeding Plant in the Krasnoarmeysky District of the Krasnodar Krai. The object of the experiment was a John Deere-7830 tractor with an experimental harrow with rotary disc section. Soil cultivation was carried out simultaneously with chisel and disc working tools without rollers (Fig. 6).

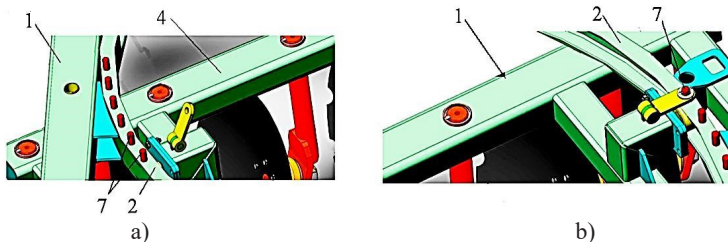


Fig. 5. Rotary disc section in (a) unlocked and (b) locked position

The most significant factors affecting the soil cultivation quality according to agricultural requirements are [24]:

- v is speed of movement of the machine-tractor unit (km/h);
- α is approach angle of disc (degree).

A two-factor experiment was carried out on the basis of a symmetrical composition plan [25–27]. The levels of factors were chosen so that their optimal values were in the center of the variation interval. The speed of movement v of the unit varied from 6 to 12 km/h. The approach angle of disks α varied in the range of 15–45° (Table 1).

Factors were coded according to the expression:

$$x_i = \frac{x_i + x_{i0}}{\Delta_i}, \quad (1)$$

where x_i is coded value of the i -th factor; x_p , x_{i0} are natural values of the i -th factor in the center of the experiment plan; Δ_i is factor

variation interval; $i = 9$ is serial number of the experiment.

Mathematical processing of the experiment was carried out in the Mathcad program with subsequent approximation of the results by a second-order polynomial.

The quality of soil crumbling was determined according to GOST 33736–2016. Samples were taken from four points (repeatability) of the plot. Two samples were taken in the direction of movement of the unit and two samples were taken in the opposite direction.

Results

The results of experiments to ensure the required quality of soil cultivation, according to agro-technical requirements, are presented in Table 2.

The regression equation in coded form (according to the results of Table 2) is:

$$\bar{Y} = 85.872 + 1.464x_1 + 2.97x_2 - 2.655x_1x_2 - 14.553x_1^2 - 10.39x_2^2, \quad (2)$$



Fig. 6. John Deere-7830 tractor with experimental harrow in field trials

Table 1

Factors, intervals and levels of variation

Variable factors	Coded designations x_i	Change interval Δ_i	Factor level		
			+1	0	-1
Movement speed	x_1 , m/s	3	12	9	6
Disc angle	x_2 , degree	15	45	30	15

Table 2

Experimental results

Experiment number	Factor		Response			
	x_1	x_2	Y_1	Y_2	Y_3	mean \bar{Y}
1	+1	+1	62.66	62.81	62.33	62.60
2	-1	+1	65.10	64.10	65.46	64.89
3	+1	-1	63.90	60.48	62.10	62.16
4	-1	-1	55.50	53.73	52.40	53.88
5	-1	0	73.00	72.50	72.80	72.77
6	-1	0	69.20	70.90	69.22	69.77
7	0	+1	77.50	78.90	78.50	78.30
8	0	-1	71.70	72.50	73.50	72.57
9	0	0	85.30	86.80	85.35	85.82

where \bar{Y} is soil tillage quality according to agrotechnical requirements, %; x_1 is a coded value of the aggregate speed, km/h; x_2 is the coded value of the approach angle of discs (degree).

According to Student t-test, all regression coefficients are statistically significant [26]. According to the Fisher criterion, the adequacy of the equation (2) is confirmed [25].

To solve the optimization problem, we differentiated equation (2) for each of the variables:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{Y}}{\partial x_1} = 1.464 - 2.655x_2 - 29.106x_1, \\ \frac{\partial \bar{Y}}{\partial x_2} = 2.97 - 2.655x_1 - 20.78x_2. \end{cases} \quad (3)$$

The coordinates of the extremum points of the response surface are obtained $x_1 = 0.0377$, $x_2 = 0.1381$ by equating the partial derivatives to zero (3). We have substituted the values x_1 and x_2 into the regression equation (2) and found the values of the optimization parameter at the extremum point of the response surface with a constant free term $\bar{Y}_{\max} = 86.1\%$.

After moving the center to the point of extremum and rotation of axes in factor

space by an angle of 16.26° , the regression equation (2) was reduced to the canonical form:

$$\bar{Y} - 86.1 = -14.94x_1^2 - 10.0x_2^2. \quad (4)$$

The same signs of the canonical equation coefficients (4) indicate that the response surface has the shape of a paraboloid of revolution. And their negative values indicate that at the point with coordinates $x_1 = 0.0377$, $x_2 = 0.1381$ is the maximum of the response function \bar{Y} . The conversion of the encoded factors x_1 and x_2 into real values (1) showed the values of the motion speed $v = 9.1$ km/h and the approach angle of disc $\alpha = 32^\circ$, providing the maximum quality of tillage $\bar{Y}_{\max} = 86.1\%$ (Fig. 7).

Next, using two-dimensional sections of the response surface \bar{Y} a family of conjugate isolines in the form of hyperbolas was obtained near the optimal values of the factors (Fig. 8).

Dependences (Fig. 7) of the tillage quality \bar{Y} on the motion speed v were obtained by approximation for different rotation angles of disks:

$$\begin{aligned} \alpha = 32^\circ; \bar{Y} &= -14.55^2 + 1.831 + 85.26; \\ \alpha = 45^\circ; \bar{Y} &= -14.55^2 + 4.119; \\ \alpha = 15^\circ; \bar{Y} &= -14.55^2 - 1.191 + 78.45. \end{aligned}$$

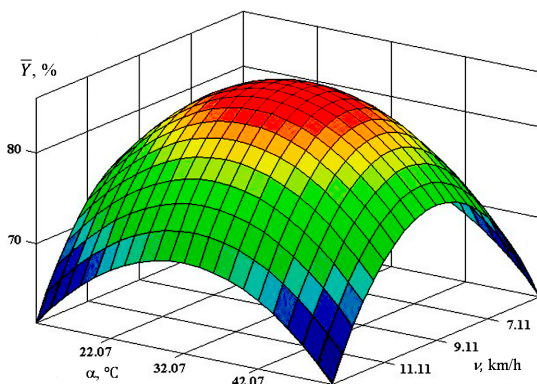


Fig. 7. The response surface of the quality of tillage according to agricultural requirements \bar{Y} to the motion speed v and the approach angle of disks α

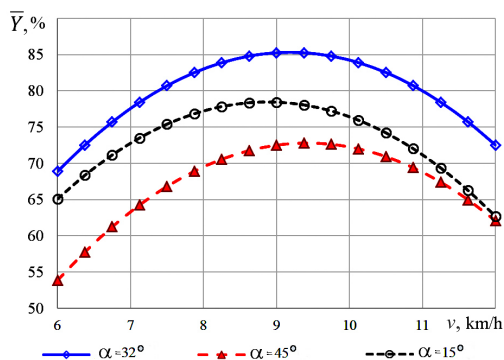


Fig. 8. The dependence of the quality of tillage \bar{Y} on the motion speed v at different approach angles of disks α

The nature of the isolines obtained as a result of the section of the response surface \bar{Y} (Fig. 7), shows that the motion speed v has a greater impact on the quality of tillage than the disk approach angle α .

The same conclusion confirms the smaller absolute value of the coefficient of the second factor x_2 canonical equation (4). The appearance of the treated soil in the experimental area of the field is shown in Fig. 9.



Fig. 9. Appearance of the soil after cultivating with an experimental harrow

Discussion and Conclusion

There has been developed a design of a harrow with a turning disc section confirmed by a patent of the Russian Federation [23]. The design excludes manual adjustment using wrenches, thereby ensuring an increase in operational reliability and a reduction in energy costs. The range of change of the approach angle of disk working bodies is from 5 to 45°.

It was revealed that the following factors have the greatest influence on the quality of tillage: the motion speed n and the approach angle of discs α . Based on a two-factor experiment, the optimal parameters of the harrow for high-quality smooth plowing are determined.

The maximum quality of tillage $\bar{Y} = 86.1\%$ was obtained at the speed of movement $v = 9.1$ km/h and the attack angle of working disks $\alpha = 32^\circ$.

REFERENCES

1. Panettieri M., Knicker H., Berns A.E., et al. Moldboard Plowing Effects on Soil Aggregation and Soil Organic Matter Quality Assessed by ^{13}C CPMAS NMR and Biochemical Analyses. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013;177:48–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.025>
2. Shevnikov M., Milenko O., Lotysh I., et al. The Productivity of Soybeans Depending on the Conditions of Moisture Supply to the Soil. *American Journal of Agriculture and Forestry*. 2021;9(4):211–218. doi: <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20210904.17>
3. Acharya B.S., Dodla S., Gaston L.A., et al. Winter Cover Crops Effect on Soil Moisture and Soybean Growth and Yield under Different Tillage Systems. *Soil and Tillage Research*. 2019;195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104430>
4. Cherenkov A.V., Shevchenko M.S., Gyrka A.D. et al. Increasing the Efficiency of Moisture Resources in Crop Rotation by Tillage Optimization in Ukrainian Steppe Zone. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021;11(2):35–39. Available at: <https://clck.ru/33GrJe> (accessed 01.12.2022).
5. Lobachevsky Y.P., Liskin I.V., Panov A.I., et al. Ploughing Quality and Energy Consumption Depending on Plough Bodies Type. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1030. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012154>
6. Svechnikov P.G., Troyanovskaya I.P. Tractor Plough Designing with Specified Tillage Quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;341. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012119>
7. Aldoshin N., Kurbanov S., Abdullaev A., et al. Parameters of the Angle-Lift of the Front Plow for Smooth, Rowless Plowing. *E3S Web of Conferences*. 2021;264. doi: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202126404042>
8. Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B., et al. Development of a Frontal Plow for Smooth, Furless Plowing with Cutoffs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1030. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012135>
9. Blednykh V.V., Svechnikov P.G., Troyanovskaya I.P. Tractor Plough with Repeated Cutting Angle on Working Elements. *Procedia Engineering*. 2017;206:1577–1582. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.680>
10. Tarasenko B., Drobot V., Troyanovskaya I., et al. Research and Development of a Combined Unit for Tillage with a Layer Turnover. *Journal of Terramechanics*. 2022;99:29–33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.11.002>
11. Syromyatnikov Y., Troyanovskaya I., Voinash S., et al. Productivity of Tillage Loosening and Separating Machines in an Aggregate with Tractors of Various Capacities. *Journal of Terramechanics*. 2021;98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.09.002>
12. Mahatale Y.V., Tathod D.V., Chavan V.K. Performance of Reversible Mold Board Plow. In: M.R. Goyal (ed.). *Emerging Technologies in Agricultural Engineering*. New York: Apple Academic Press; 2017. p. 137–163. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315366364>
13. Chandra Mouli K., Arunkumar S., Satwik B., et al. Design of Reversible Plough Attachment. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(11):23702–23709. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.160>

14. Song Y., Chang B., Jin G., et al. Dynamics Modeling and Analysis of a Novel Constraint Metamorphic Reversible Plough. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019;2019. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/8370827>
15. He Y., Hu C., Yang Q., et al. Optimal Design of the Surface of the High-Speed Reversible Plow. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2022;66(1):81–90. doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-66-08>
16. Blednykh V.V., Svechnikov P.G., Troyanovskaya I.P. Moldboard Surface Universalization of the Ploughshare Operating Unit. *Procedia Engineering*. 2016;150:1297–1302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.297>
17. Borisenko I.B., Pavlenko V.I., Kondakov S.Y., et al. [Tillage Implement]. Patent 2,399,177 Russian Federation. 2010 September 20. (In Russ.)
18. Mishurov N.P., Sviridova S.A., Petukhov D.A., et al. Evaluation of the Efficiency of Two-Row Disc Harrows to Be Used Along with Energy-Intensive Tractors. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021;3:45–48. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-3-45-48>
19. Medovnik A.N., Tarasenko B.F., Tverdokhlebov S.A. [Tillage Apparatus]. Patent 2,298,302 Russian Federation. 2007 October 5. (In Russ.)
20. Tarasenko B.F., Orlenko S.Y., Dmitriev, D.A., et al. [Mounted Disco-Chisel Harrow]. Patent 206,472 Russian Federation. 2021. (In Russ.)
21. Tarasenko B.F., Orlenko S.Y., Kuzmin V.V. Universal Tillage Unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;666. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/3/032092>
22. Tarasenko B.F., Romanov S.Y., Orlenko S.Y., et al. [Plow with Swivel Beam]. Patent 193,872 Russian Federation. 2019. (In Russ.)
23. Tarasenko B.F., Romanov S.Y., Orlenko S.Y., et al. [Harrow with Rotary Disc Section]. Patent 207,705 Russian Federation. 2021. (In Russ.)
24. Blednykh V.V., Svechnikov P.G., Troyanovskaya I.P. Analytical Model of the Technological Process of Soil Pulverization and Tillage Tools. *Procedia Engineering*. 2015;129:69–74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.010>
25. Saleh H., Hasanah S.I., Subaidi A. Implementation of Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) in Experiments Factorial Two Factors (Study: Growth and Development of Soybean Germination). *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1375. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1375/1/012013>
26. Loughin T.M., Johnson D.E., Ives S.E., Nagaraja T.G. Methods for Selecting Crossover Designs with Applications to an Experiment with Two Factors in a Split Plot. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*. 2002;7(2):143–156. doi: <https://doi.org/10.1198/10857110260141201>
27. Rohan V.M., Jones G. Efficient Run Orders for a Two-Factor Response Surface Experiment on a Correlated Process. *Communications in Statistics Part B: Simulation and Computation*. 2000;29(3):593–609. doi: <https://doi.org/10.1080/03610920008832504>

Submitted 05.12.2022; revised 09.01.2023; accepted 16.01.2023

Поступила 05.12.2022; одобрена после рецензирования 09.01.2023; принята к публикации 16.01.2023

About the authors:

Boris F. Tarasenko, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Tractors, Automobiles and Technical Mechanics, Kuban State Agrarian University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9957-5979>, Scopus ID: 57200221398, b.tarasenko@inbox.ru

Vitaly V. Kuzmin, Postgraduate Student of the Chair of Tractors, Automobiles and Technical Mechanics, Kuban State Agrarian University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9089-6554>, Scopus ID: 57222472905, shef.737@mail.ru

Irina P. Troyanovskaya, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Wheeled and Tracked Vehicles, South Ural State University (76 Lenin Avenue, Chelyabinsk 454080, Russian Federation); Professor of the Chair of Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture, South Ural State Agrarian University (13 Gagarina St., Troitsk 457100, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>, Researcher ID: H-7490-2017, Scopus ID: 57170706600, tripav63@mail.ru

Svetlana A. Partko, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Fundamentals of Machine Design, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-0716>, Researcher ID: AAG-6090-2019, Scopus ID: 57202051755, parlana@rambler.ru

Sergey A. Voinash, Leading Engineer of the Research Laboratory of Intellectual Mobility, Institute of Design and Spatial Arts, Kazan Federal University (18 Kremlin St., Kazan 420008, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, Scopus ID: 57194339935, sergey_voi@mail.ru

Authors contribution:

B. F. Tarasenko – idea of designing a new harrow and the author of the patent.

V. V. Kuzmin – conducted experimental research with an experimental harrow.

I. P. Troyanovskaya – conducted a mathematical treatment of the experiment results, analyzing and drawing conclusions.

S. A. Partko – prepared and designed the material of the article.

S. A. Voinash – made a prototype of an experimental harrow.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Борис Федорович Тарасенко, доктор технических наук, профессор кафедры тракторов, автомобилей и технической механики Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9957-5979>, Scopus ID: 57200221398, b.tarasenko@inbox.ru

Виталий Викторович Кузьмин, аспирант кафедры тракторов, автомобилей и технической механики Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9089-6554>, Scopus ID: 57222472905, shef.737@mail.ru

Ирина Павловна Трояновская, доктор технических наук, профессор кафедры колесных и гусеничных машин Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76); профессор кафедры тракторов, сельскохозяйственных машин и земледелия Южно-Уральского государственного аграрного университета (457100, Российская Федерация, г. Троицк, ул. Гагарина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>, Researcher ID: H-7490-2017, Scopus ID: 57170706600, tripav63@mail.ru

Светлана Анатольевна Партко, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-0716>, Researcher ID: AAG-6090-2019, Scopus ID: 57202051755, parlana@rambler.ru

Сергей Александрович Войнаш, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории интеллектуальной мобильности Института дизайна и пространственных искусств Казанского федерального университета (420008, Российская Федерация, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, Scopus ID: 57194339935, sergey_voi@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Б. Ф. Тарасенко – идея конструирования новой бороны, автор патента.

В. В. Кузьмин – экспериментальные исследования опытной бороны.

И. П. Трояновская – математическая обработка результатов эксперимента, анализ и формирование выводов.

С. А. Партко – подготовка и оформление статьи.

С. А. Войнаш – разработка опытного экземпляра экспериментальной бороны.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Влияние диаметра присасывающих отверстий аппарата точного высева на характеристики подачи семян кукурузы и подсолнечника

А. Ю. Несмиян , К. П. Дубина, А. П. Жигайлова

*Азово-Черноморский инженерный институт Донского ГАУ
(г. Зерноград, Российская Федерация)*

 nesmiyan.andrei@yandex.ru

Аннотация

Введение. Исследование рабочих процессов пропашных сеялок, их совершенствование, повышение производительности и качества работы являются актуальными агроинженерными задачами.

Цель статьи. Формирование предложений по оптимизации конструкции вакуумных аппаратов пропашных сеялок на основе анализа закономерностей процесса дозирования семян подсолнечника и кукурузы присасывающими отверстиями их высевающих дисков.

Материалы и методы. Характеристики работы вакуумного высевающего аппарата зависят от диаметра присасывающих отверстий и величины разрежения в вакуумной камере. Гипотетически можно предположить, что при постоянном расчетном значении силы присасывания можно подобрать такое их соотношение, при котором количество пропусков и групповых подач семян не будет превышать допуски агротребований. Проверка этого предположения проводилась экспериментально в лабораторных условиях.

Результаты исследования. Найдены полиномы, с высокой точностью описывающие зависимость вероятности образования групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий.

Обсуждение и заключение. Частота групповых подач семян менее 0,05 будет обеспечиваться при диаметре присасывающих отверстий около 0,8 мм для подсолнечника и около 1,9 мм для кукурузы. При этом значения разрежений в вакуумной камере должны будут составлять 31–56 кПа, что превосходит возможности пневмосистем существующих пропашных сеялок. Соответственно, модернизация высевающих аппаратов вакуумных пропашных сеялок за счет уменьшения диаметра присасывающих отверстий должна сопровождаться дополнительными усовершенствованиями, направленными на повышение их захватывающей способности.

Ключевые слова: пропашные культуры, вакуумный высевающий аппарат, диаметр присасывающих отверстий, групповые подачи семян, разрежение, сбрасыватель лишних семян

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.




Для цитирования: Несмиян А. Ю., Дубина К. П., Жигайлова А. П. Влияние диаметра присасывающих отверстий аппарата точного высева на характеристики подачи семян кукурузы и подсолнечника // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 21–36. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.021-036>

Original article

Influence of Suction Hole Diameter of Precision Seed Machine on the Characteristics of Feeding Corn and Sunflower Seeds

A. Yu. Nesmiyan , K. P. Dubina, A. P. Zhigailova

Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (Zernograd, Russian Federation)

 nesmiyan.andrei@yandex.ru

Abstract

Introduction. The study of working processes of row crop seeders, their improvement, increase in productivity and (or) quality of work are topical agroengineering tasks.

Aim of the Article. The article deals with developing proposals to optimize the design of vacuum mechanisms for row crop seeders based on the analysis of the laws of the process of dosing sunflower and corn seeds by suction holes of the seed discs.

Materials and Methods. The operation characteristics of the vacuum seeding mechanism depend on the diameter of the suction holes and the rarefaction in the vacuum chamber. Hypothetically, it can be assumed that with a constant calculated value of the suction force, it is possible to choose a ratio of these characteristics in which the number of skips and group feeding of seeds will not exceed the tolerance of agro-requirements. Verification of this assumption was carried out experimentally in laboratory conditions.

Results. There were found polynomials describing with a fair degree of accuracy the dependence of formation of group feedings of sunflower and corn seeds on the diameter of suction holes.

Discussion and Conclusion. The frequency of group feeding of the seeds less than 0.05% will be achieved with suction hole diameters of about 0.8 mm for sunflower and about 1.9 mm for corn. In this case, the values of rarefaction in the vacuum chamber must be 31–56 kPa that exceeds the capabilities of the pneumatic systems of existing row seeders. Accordingly, the modernization of the seeding mechanisms of vacuum row seeders by reducing the diameter of the suction holes should be accompanied by additional improvements aimed at increasing their gripping ability.

Keywords: row crops, vacuum seeding mechanism, diameter of suction holes, group feeding of seeds, rarefaction, ejector of extra seeds

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

Funding: The study was financially supported by the Foundation for the Promotion of Innovation.

For citation: Nesmiyan A.Yu., Dubina K.P., Zhigailova A.P. Influence of Suction Hole Diameter of Precision Seed Machine on the Characteristics of Feeding Corn and Sunflower Seeds. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):21–36. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.021-036>

Введение

Важной составляющей производимой сельскохозяйственной продукции как в стране, так и во всем мире являются пропашные культуры, к которым относят подсолнечник, бахчевые, кукурузу, сахарную свеклу и др.¹. Благодаря высокому уровню рентабельности и новым направлениям реализации объемы производства возрастают² [1; 2]. Например, с начала XXI века площади, занятые сахарной свеклой и подсолнечником в РФ, выросли приблизительно в полтора раза, а кукурузой на зерно – больше чем в 3 раза. Посевные площади основных пропашных культур на данном этапе возросли практически на 2,4 млн га. На их долю в общей структуре российских посевных площадей, с учетом варьирования по годам, приходится 21–25 %, из которых около 40 % заняты подсолнечником и около 20 % кукурузой. В отдельных случаях их популярность среди сельхозпроизводителей настолько велика, что уровень производства (например, подсолнечника) сдерживали законодательно³.

Пропашные культуры отличаются высокой требовательностью к условиям возделывания, в том числе и по агроклиматическим условиям [3]. В связи

с потребностью в высоком уровне инсоляции пропашные культуры неравномерно распределены по сельскохозяйственным зонам РФ. Можно отметить шесть регионов страны (Ростовская область, Краснодарский край, Воронежская область, Оренбургская область, Волгоградская область и Ставропольский край), в которых сосредоточено почти 50 % посевов подсолнечника и почти 60 % посевов кукурузы на зерно⁴. Для большинства из этих регионов характерны засушливые условия, которые накладывают специфические ограничения на показатели реализации большинства технологических операций, в том числе и на такую базовую операцию, как посев.

Посев пропашных культур, особенно в засушливых условиях, должен проводиться в сжатые сроки, соответствующие оптимальному состоянию почвы по влажности и температуре на глубине заделки семян [4–7]. Так, в советские годы нормативная загрузка пропашной (кукурузной) сеялки составляла около 60 ч, что для восьмизрядковой сеялки соответствовало примерно 200 га посевов⁵. В настоящее время в условиях определенной недостаточности технического оснащения части аграрных предприятий годовая нагрузка на сельскохозяйственные машины

¹ РОССТАТ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/bgd/free> (дата обращения: 28.06.2022) ; Несмиян А. Ю. Совершенствование технологического процесса высева семян тыквы аппаратом пневматической сеялки : дис. ... канд. техн. наук. Зерноград : Донской государственный аграрный университет, 2003. 139 с. ; QDAF, Varieties and Planting of Maize [Электронный ресурс] // Department of Agriculture, Fisheries and Forestry Queensland, 2016. URL: <https://www.daf.qld.gov.au/business-priorities/agriculture/plants/crops-pastures/broadacre-field-crops/varieties-planting-maize> (дата обращения: 17.09.2022) ; World of Corn. U.S Production Per State from USDA Data [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldofcorn.com/#us-corn-production-by-state> (дата обращения: 17.09.2022).

² Maize Production Technologies in India [Электронный ресурс] / С. М. Parihar [et al.] // DMR Technical Bulletin. Directorate of Maize Research. 2011. URL: <https://iimr.icar.gov.in/wp-content/uploads/2020/03/Maize-production-technologies-03012017.pdf> (дата обращения: 17.09.2022).

³ Постановление администрации Ростовской области от 16 апреля 2009 года N 182 «Об утверждении Правил рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в Ростовской области» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/816100094#8MQN79> (дата обращения: 17.09.2022).

⁴ РОССТАТ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/bgd/free> (дата обращения: 28.06.2022).

⁵ Нормативная годовая загрузка тракторов и сельскохозяйственных машин (справочное) [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/2905742/page:58> (дата обращения: 05.07.2022).

существенно возросла. Как показывает практика, в отдельных хозяйствах годовая загрузка пропашных сеялок доходит до 500 га и более. Решая проблему затягивания сроков посева, производители пытаются реализовывать эту операцию на повышенных рабочих скоростях агрегатов, что на классических сеялках приводит к снижению качества посева как по показателю распределения семян по площади поверхности поля, так и по глубине заделки⁶ [8; 9]. Таким образом, исследование рабочих процессов элементов пропашных сеялок, оптимизация их конструкции, повышение производительности и (или) качества реализации процессов является актуальной задачей, решение которой будет иметь значение для растениеводческой отрасли сельскохозяйственного производства [10–13].

Цель статьи – формирование предложений по оптимизации конструкции вакуумных аппаратов пропашных сеялок на основе анализа закономерностей процесса дозирования семян подсолнечника и кукурузы присасывающими отверстиями их высевальных дисков.

Обзор литературы

Одним из важнейших узлов пропашных сеялок является высевальной аппарат⁷ [14–16], обеспечивающий поштучное дозирование семян и примерно равномерную подачу их в борозду, подготовленную сошником. По типу высевальных аппаратов сеялки делятся на механические [17] и пневматические (вакуумные и избыточного давления)⁸ [18–20]. Аппараты избыточного давления наибольшее распространение получили на американском континенте,

хотя в настоящее время и в нашей стране ведутся работы по их массовому внедрению в практику на предприятиях отечественного сельхозмашиностроения [21–24]. В европейских и азиатских странах, в том числе и в Российской Федерации, производители отдают предпочтение вакуумным машинам, к которым относятся почти 80 % марок используемых в России пропашных сеялок⁹.

Основным рабочим элементом вакуумных аппаратов является высевальной диск с выполненными в нем присасывающими отверстиями (в подавляющем большинстве случаев круглой формы), диаметр которых на 30–50 % меньше усредненного приведенного значения диаметра высеваемых семян¹⁰ [25–27]. С одной стороны диска расположен слой посевного материала, с другой создается разрежение, обуславливающее возникновение силы присасывания $P_{пр}$ (рис. 1), которая формирует условно полезную силу трения $P_{трд}$ диска о семя, компенсирующую условно вредную равнодействующую R сил сопротивления, противодействующих выносу семени, и позволяющую удержать его у присасывающего отверстия при вращении высевальной диска [26; 27].

С целью оптимизации соотношения этих сил как отечественными, так и зарубежными исследователями были предложены различные варианты модификации или модернизации высевальных аппаратов: использование выступов или ниппелей, нанесение напылений на высевальной диск, применение дополнительных активаторов семян [28]; применение дозирующих элементов

⁶ Чернышов А. В., Солдатов Ю. И. Экспериментальное исследование качества посева сои высевальной секцией сеялки ТСМ-4150 // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (на иностранных языках). Воронеж, 2022. С. 78–82.

⁷ Несмиян А. Ю. Совершенствование технологического процесса посева...

⁸ Оптимизация вакуумных высевальных аппаратов пропашных сеялок / А. Ю. Несмиян [и др.].
Зерноград, 2013. 176 с.

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

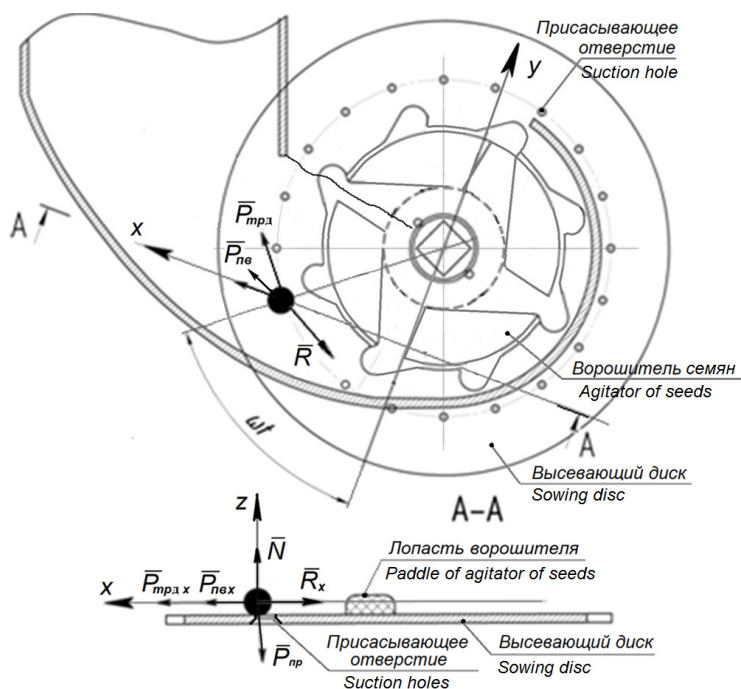
некруглой формы или переменной во времени площади [14; 16]; снижение потерь вакуума просасыванием за счет применения «закрытых» (барабанных) вакуумных камер; расположение дозирующих элементов на подвижных «язычках», позволяющих менять их радиальное расположение при захвате и при сбросе семян в борозду и др. [28].

С учетом ряда допущений условие выноса семени из общего массива в устойчивой теории высевяющих аппаратов описывается неравенством (рис. 1)

$$\bar{P}_{\text{трд}} > \bar{R} - \bar{P}_{\text{пв}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{трд}}$ – сила трения высевяющего диска о семя, N ; R – равнодействующая действующих на семя сил сопротивления, N ; $P_{\text{пв}}$ – сила подпора семени со стороны ворошителя через слой семян, N .

Равнодействующая сил сопротивления R включает силу трения прилегающего слоя семян о выносимое семя, лобовое сопротивление вышележащего слоя семян, центробежную силу, силу тяжести, силу инерции и т. д. [26; 27].



Р и с. 1. Схема сил, действующих на семя при его захвате присасывающими отверстиями: $P_{\text{трд}}$ – сила трения высевяющего диска о семя, N ; R – равнодействующая сил сопротивления, действующих на семя, N ; $P_{\text{пв}}$ – сила подпора семени через слой семян со стороны ворошителя, N ; $P_{\text{пр}}$ – сила присасывания, N ; N – нормальная реакция, действующая на семя со стороны высевяющего диска, N ; $P_{\text{трд}x}$, $P_{\text{пв}x}$, R_x – проекции соответствующих сил на ось X ; ω – угловая скорость высевяющего диска, с^{-1}

F i g. 1. Scheme of forces acting on the seed when it is captured by suction holes: $P_{\text{трд}}$ – friction force of the sowing disc on the seed, N ; R – resultant of the resistance forces acting on the seed, N ; $P_{\text{пв}}$ – force of seed support through the layer of seeds from the agitator, N ; $P_{\text{пр}}$ – suction force, N ; N – normal reaction acting on the seed from the sowing disc, N ; $P_{\text{трд}x}$, $P_{\text{пв}x}$, R_x – projections of the corresponding forces on the axis X ; ω – sowing disc angular speed, s^{-1}

Сила присасывания $P_{пр}$ складывается из двух составляющих: аэродинамической силы потока воздуха и контактной силы. Однако при ряде упрощений и использовании эмпирических коэффициентов она может рассматриваться только как контактная, ее величина с достаточной точностью определяется из выражения

$$P_{пр} = 0,25k\pi d^2 H, \quad (2)$$

где k – эмпирический коэффициент присасывания воздуха (может варьироваться в достаточно широких пределах – от 0,5 до 1,0), при примерных расчетах примем $k = 0,75$; d – диаметр присасывающего отверстия, м; H – величина разрежения в плоскости рабочей части присасывающего отверстия (условно в вакуумной камере), Па¹¹.

С учетом изложенного условие выноса семени из общего слоя семян может быть представлено в виде

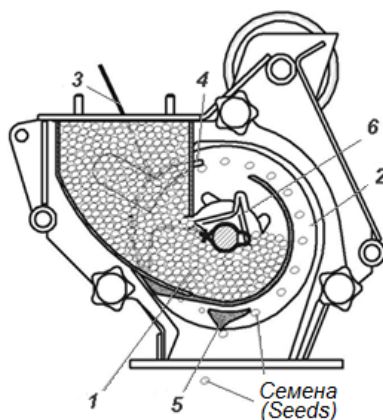
$$d^2 H > \frac{4|\bar{R} - \bar{P}_{пв}|}{fk\pi}, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения семян о поверхность высевающего диска.

Очевидно, что характеристики работы вакуумного высевающего аппарата находятся в зависимости от диаметра присасывающих отверстий (квадратично) и величины разрежения в вакуумной камере. На практике задаются такими значениями этих параметров, чтобы обеспечить гарантированный захват семени присасывающим отверстием. При этом, как правило, удается избежать нулевых подач, однако появляется большое количество групповых подач

(одним присасывающим отверстием захватывается более одного семени), а их присутствие также отрицательно воздействует на требования к дальнейшему росту и развитию растений¹² [26].

Для устранения групповых подач в конструкции вакуумных высевающих аппаратов предусмотрен сбрасыватель «лишних» семян. На подавляющем большинстве современных устройств такого типа установлены плоские, ступенчатые (пилообразные) сбрасыватели (4 на рисунке 2) отдавливающего действия. Под их действием группа семян смещается к оси вращения высевающего диска, и те из них, которые были зафиксированы у присасывающего отверстия наихудшим образом, падают обратно в семенную камеру¹³ [26].



Р и с. 2. Схема вакуумного высевающего аппарата¹⁴: 1 – семенная (заборная) камера; 2 – высевающий диск; 3 – сводоразрушитель; 4 – сбрасыватель «лишних» семян; 5 – сбрасыватель-направитель; 6 – ворошитель семян

Fig. 2. Scheme of a vacuum seeding mechanism: 1 – seeds chamber; 2 – sowing disk; 3 – vault destroyer; 4 – “extra” seed remover; 5 – agitator of seeds; 6 – dropping-guiding device

¹¹ Там же.

¹² Там же.

¹³ Там же.

¹⁴ Millerovoselmash. MS-8 Block-Type Seeder (Basic Model). Operation Manual (for an Operator) [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosagromir.ru/upload/iblock/fb0/MS_8_manual.pdf (дата обращения: 17.09.2022).

Сложность использования сбрасывателей «лишних» семян вытекает из их трудоемкой настройки, которая проводится вручную, и на режимах, не соответствующих реальным режимам работы сеялки. Зачастую на практике она вообще не проводится или проводится формально, что не позволяет реализовать в полной мере функциональный потенциал пропашных сеялок ни по равномерности распределения семян по площади поля, ни по норме высева, ни по производительности.

Материалы и методы

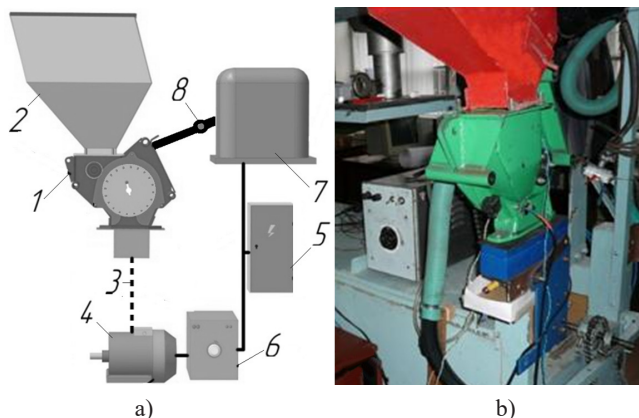
Ранее (3) было установлено, что показатели работы вакуумного высевающего аппарата напрямую зависят от величины произведения d^2H . При этом гипотетически можно предположить, что даже при $d^2H = \text{const}$ параметры средней подачи семян присасывающими отверстиями могут существенно меняться при изменении соотношения значений d и H . Теоретически можно подобрать такое их соотношение, при котором количество пропусков и групповых

подач семян не будет превышать допуск агротребований.

Проверка этого предположения проводилась экспериментальным путем на универсальном стенде в лабораторных условиях при высеве семян двух наиболее популярных пропашных культур: подсолнечника (гибрид Лакомка) и кукурузы (сорт Зерноградский 282 МВ) – с использованием оригинального вакуумного высевающего аппарата сеялки типа МС (ОАО «Миллеровосельмаш», г. Миллерово Ростовской области)¹⁵ [29]. Техническое состояние высевающего аппарата удовлетворительное, срок наработки в лабораторных условиях около 70 ч, в полевых условиях не эксплуатировался.

Экспериментальное исследование было направлено на оценку показателей работы вакуумного высевающего аппарата при постоянном значении силы присасывания, но при разных размерах присасывающих отверстий.

Схема лабораторного стенда для исследования высевающих аппаратов точного высева изображена на рисунке 3.



Р и с. 3. Стенд для исследования высевающего аппарата: а) схема лабораторного стенда; б) внешний вид стенда; 1 – исследуемый высевающий аппарат; 2 – бункер; 3 – цепные передачи; 4 – электродвигатель постоянного тока; 5 – источник питания; 6 – автотрансформатор; 7 – генератор разрежения; 8 – дроссель

F i g. 3. Stand for the study of the seeding mechanism: а) scheme of the laboratory stand; б) appearance of the stand; 1 – the studied seeding mechanism; 2 – bunker; 3 – chain drives; 4 – DC motor; 5 – power supply; 6 – autotransformer; 7 – rarefaction generator; 8 – throttle

¹⁵ Там же.

При проведении экспериментов привод высевающих аппаратов осуществлялся через набор цепных передач 3 от электродвигателя постоянного тока 4. При этом частота вращения высевающего диска устанавливалась при помощи автотрансформатора 6 (рис. 3а). Разрежение создавалось стационарным эксгаустером 7, необходимый уровень разрежения в вакуумной камере высевающего аппарата задавался и поддерживался дроссельной заслонкой 8. Величина разрежения контролировалась вакуумметром непосредственно в зоне вакуумной камеры, что позволяло не учитывать значение возможных потерь разрежения в пневмосистеме.

При высеве семян подсолнечника рекомендуется использовать диаметр присасывающих отверстий $3 \cdot 10^{-3}$ м, а при высеве кукурузы $5 \cdot 10^{-3}$ м. Соответствующие значения разрежения в вакуумной камере 4 000 и 4 500 Па¹⁶. Таким образом, при $k = 0,75$ значение присасывающей силы при высеве подсолнечника $P_{пр.п.} \approx 0,021$ Н, а при высеве

кукурузы $P_{пр.к.} \approx 0,066$ Н. Исходя из этого, при проведении экспериментального исследования выбирались следующие значения диаметров присасывающих отверстий и разрежения в вакуумной камере (табл. 1).

Все эксперименты проводились в пятикратных повторностях, в каждом из которых наблюдаемое количество присасывающих отверстий имело значение 300 шт. Частота вращения высевающего диска 40 об/мин выбиралась, исходя из предполагаемой скорости движения посевного агрегата около 3,2 м/с (около 11,5 км/ч) и норме высева около 4,2 шт./м (при 20 присасывающих отверстиях на диске). Во время реализации опытов сбрасыватель «лишних» семян демонтировался.

Проведение эксперимента при меньших значениях диаметров присасывающих отверстий, а соответственно, и больших значениях разрежения в вакуумной камере не проводились в связи с техническими возможностями используемого лабораторного стенда.

Таблица 1
Table 1

Значения диаметров присасывающих отверстий и разрежения в вакуумной камере при проведении экспериментального исследования
Values of the diameters of the suction holes and the rarefaction in the vacuum chamber during the experimental study

При высеве подсолнечника / When seeding sunflower				При высеве кукурузы / When seeding corn			
d , мм / d , mm	H , кПа / H , kPa	k	$P_{пр}$, Н / $P_{пр}$, N	d , мм / d , mm	H , кПа / H , kPa	k	$P_{пр}$, Н / $P_{пр}$, N
1,5	16,0			3,0	12,5		
2,0	9,0			3,5	9,2		
2,5	5,8			4,0	7,0		
3,0	4,0	0,75	0,021	4,5	5,5	0,75	0,066
3,5	2,9			5,0	4,5		
4,0	2,3			5,5	3,7		
–	–	–	–	6,0	3,1		

¹⁶ Там же.

Исследование в области больших значений диаметров присасывающих отверстий не проводилось, так как при этом наблюдается западание и заклинивание семян в присасывающих отверстиях.

Основные размерные характеристики используемых в эксперименте семян подсолнечника и кукурузы представлены в таблице 2.

В таблице 2 приняты следующие условные обозначения: M_{\min} – минимальный размер семян, мм; M – средний размер семян, мм; M_{\max} – максимальный размер семян, мм; σ – среднее квадратическое отклонение размеров семян, мм; V – коэффициент вариации распределения размеров семян, %; m – ошибка среднего размера семян, мм; P – показатель точности наблюдений, %.

Поисковые эксперименты показали, что при заданных силах присасывания высевной аппарат обеспечивает подачу семян практически без пропусков. Таким образом, качество его работы можно было оценивать только по одному критерию. Исходя из содержания гипотезы исследования, в качестве параметра оптимизации принималось количество групповых подач.

При проведении эксперимента движущиеся присасывающие отверстия фиксировались на видеокамеру, после

чего количество групповых подач семян подсолнечника и кукурузы подсчитывалось визуально при замедленном воспроизведении записи.

Результаты исследования

По результатам экспериментального исследования и показателям их статистической оценки сформирована таблица 3, в которой приняты следующие обозначения: $n_{\text{гср}}$ – среднее по повторам количество групповых подач семян присасывающими отверстиями, шт.; $\sigma_{\text{гг}}$ – среднее квадратическое отклонение количества групповых подач семян присасывающими отверстиями; $m_{\text{гг}}$ (шт.) и $m_{\text{огг}}$ (%) – соответственно абсолютная и относительная ошибки опыта.

Из данных таблицы 2 видно, что экспериментальное исследование было проведено с достаточно высокой точностью – практически на всех этапах относительная ошибка опыта не превысила 5 %. При этом для анализа наибольший интерес представляет показатель частоты групповых подач p_r , который определяется как отношения количества наблюдаемых в опыте групповых подач к общему количеству подач. В графическом виде зависимости частот групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий представлены на рисунке 4.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Основные размерные характеристики семян, используемых в эксперименте

Main dimensional characteristics of the seeds used in the experiment

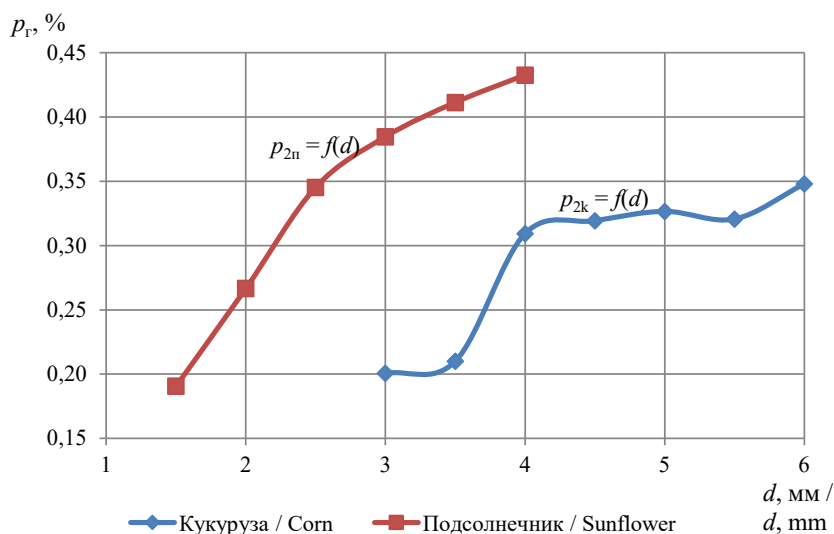
Гибрид / Сорт / Hybrid / Variety	Пионер (Подсолнечник) / Pioneer (Sunflower)			Зерноградский 282 МВ (Кукуруза) / Zernogradskiy 282 MV (Corn)		
	Длина / Length	Ширина / Width	Толщина / Thickness	Длина / Length	Ширина / Width	Толщина / Thickness
M_{\min} , мм / M_{\min} , mm	6,90	3,70	2,00	9,10	6,81	3,50
M , мм / M , mm	10,00	5,60	3,30	11,62	8,82	5,56
M_{\max} , мм / M_{\max} , mm	11,70	7,00	5,10	14,13	11,06	7,54
σ , мм / σ , mm	0,73	0,54	0,50	0,73	0,76	0,67
V , %	7,30	9,60	15,20	6,28	8,62	12,04
m , мм / m , mm	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
P , %	0,46	0,61	0,94	0,28	0,38	0,54

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Показатели подачи семян присасывающими отверстиями вакуумного высевающего аппарата
Indicators of seed feeding by suction holes of a vacuum seeding mechanism

Культура / Culture	d , мм / d , mm	H , кПа / H , kPa	$n_{гcp}$, шт. / $n_{гcp}$, pcs	$\sigma_{шт}$, шт. / $\sigma_{шт}$, pcs	$m_{шт}$, шт. / $m_{шт}$, pcs	$m_{ошт}$, % / $m_{ошт}$, %
Подсолнечник / Sunflower	1,5	16,0	57,2	5,3	2,4	4,2
	2,0	9,0	80,0	3,4	1,5	1,9
	2,5	5,8	103,6	9,6	4,3	4,2
	3,0	4,0	115,4	9,3	4,2	3,7
	3,5	2,9	123,4	17,0	7,7	6,2
	4,0	2,3	129,8	7,3	3,3	2,6
	3,5	9,2	63,0	2,1	1,0	1,5
Кукуруза / Corn	4,0	7,0	92,8	9,7	4,4	4,8
	4,5	5,5	95,8	7,1	3,2	3,4
	5,0	4,5	98,0	4,4	2,0	2,0
	5,5	3,7	96,2	5,8	2,6	2,7
	6,0	3,1	104,4	10,1	4,6	4,4



Р и с. 4. Зависимости частот групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий

F i g. 4. Dependences of the frequencies of group feeding of sunflower and corn seeds on the diameter of the suction holes

В работе были предприняты попытки аппроксимации полученных зависимостей с использованием линейного,

логарифмического, полиномиальных (второй и третьей степени) и степенного законов, результаты представлены в таблице 4.

Результаты аппроксимации зависимостей частот групповых подач семян подсолнечника и кукурузы от диаметра присасывающих отверстий**Results of approximation of the dependences of the frequencies of group feeding of sunflower and corn seeds on the diameter of the suction holes**

Культура / Culture	Закон аппроксимации / Law of Approximation	Уравнение аппроксимации / Approximation Equation	Достоверность аппроксимации / Approximation Confidence
Подсолнечник / Sunflower	Линейный / Linear	$p_{гн} = 0,096d + 0,074$	0,93
	Логарифмический / Logarithmic	$p_{гн} = 0,253\ln(d) + 0,096$	0,98
	Полиномиальный (2 ст.) / Polynomial (2 degree)	$p_{гн} = -0,034d^2 + 0,285d - 0,161$	1,00
	Полиномиальный (3 ст.) / Polynomial (3 degree)	$p_{гн} = 0,003d^3 - 0,059d^2 + 0,349d - 0,212$	1,00
	Степенной / Power	$p_{гн} = 0,1458 d^{0,8396}$	0,95
Кукуруза / Corn	Линейный / Linear	$p_{гк} = 0,049d + 0,072$	0,78
	Логарифмический / Logarithmic	$p_{гк} = 0,218 \ln(d) - 0,032$	0,83
	Полиномиальный (2 ст.) / Polynomial (2 degree)	$p_{гк} = -0,021d^2 + 0,238d - 0,333$	0,89
	Полиномиальный (3 ст.) / Polynomial (3 degree)	$p_{гк} = 0,004d^3 - 0,079d^2 + 0,492d - 0,691$	0,89
	Степенной / Power	$p_{гк} = 0,0845d^{0,822}$	0,81

Обсуждение и заключение

Из данных, указанных в таблице 4, можно увидеть, что наибольшая фактичность описания зависимостей была как для подсолнечника, так и для кукурузы получена при применении полиномиальных законов. Причем в обоих случаях применение квадратного полинома обеспечивает практически такую же достоверность, как и кубического, поэтому логично использовать полиномы меньшей степени. Решение соответствующих уравнений позволяет предположить, что частота групповых подач семян менее 5 % может быть обеспечена при диаметре присасывающих отверстий около 0,8 мм при высевае семян подсолнечника и около 1,9 мм при высевае кукурузы. При этом значения разрежений в вакуумной

камере должны составлять 31–56 кПа, что практически на порядок превосходит традиционные показатели работы пневмосистем вакуумных пропашных сеялок. Из чего можно заключить, что при совершенствовании конструкции высевяющих аппаратов вакуумных пропашных сеялок, за счет уменьшения диаметра присасывающих отверстий, необходимо параллельно внедрять модернизации, направленные на повышение их захватывающей способности.

В целом исследование, проведенное с использованием вакуумного высевяющего аппарата сеялки МС-8, позволяет заключить, что при заданных параметрах и режимах работы высевяющего аппарата зависимость образования групповых подач семян подсолнечника от диаметра

присасывающих отверстий (при расчетном значении силы присасывания около 0,021 Н) может быть с достаточно высокой точностью описана полиномом второй степени $p_{\text{тп}} = -0,034d^2 + 0,285d - 0,161$, а при высеве кукурузы – полиномом $p_{\text{тк}} = -0,021d^2 + 0,238d - 0,333$ (при расчетном значении силы присасывания около 0,066 Н). Решение полученных уравнений позволяет предположить, что частота групповых подач семян менее 5 % будет обеспечиваться при диаметре присасывающих отверстий до 0,8 мм для подсолнечника и до 1,9 мм для кукурузы.

Но нужно учитывать, что для достижения рациональных величин силы присасывания значения разрежений в вакуумной камере должны будут составлять 31–56 кПа, что существенно превосходит предельные показатели работы пневмосистем существующих вакуумных сеялок. Таким образом, модернизация высевающих аппаратов вакуумных пропашных сеялок, ориентированная на уменьшение диаметров присасывающих отверстий, должна одновременно быть направлена на повышение их захватывающей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orjuela S., Pabon J., Fonseca M. Experimental Assessment of Emissions in Low Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends of Palm and Sunflower Oil // *International Journal on Engineering Applications*. 2021. Vol. 9, Issue 3. P. 128–136. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19810>
2. Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion of Maize Waste: a Case Study / M. A. Bellahkim [et al.] // *International Journal on Engineering Applications*. 2021. Vol. 9, Issue 3. P. 173–179. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19167>
3. Sunflower Crop and Climate Change: Vulnerability, Adaptation, and Mitigation Potential from Case-Studies in Europe / P. Debaeke [et al.] // *OCL Oilseeds Fats Crops Lipids*. 2017. Vol. 24, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
4. Potential of Corn Silage Production in Different Sowing Times in the Paraná Midwest Region / M. Neumann [et al.] // *Applied Research & Agrotechnology*. 2016. Vol. 9, Issue 1. P. 37–44. doi: <https://doi.org/10.5935/PAET.V9.N1.04>
5. Markova N. V. Influence of Sowing Terms and Technological Features of Cultivation on the Formation of Yield and Seed Quality of Hybrids of Sunflower // *Herald of Agrarian Science of Black Sea Region*. 2010. Issue 2. P. 212–218.
6. Optimization of Sowing Time for Grain Sorghum and Millet / A. V. Baranovsky [et al.] // *Bioscience Research*. 2020. Vol. 17, Issue 2. P. 1121–1128.
7. Effects of Cropping Architect and Sowing Date on Forage Quantity and Quality of Corn (*Zea Maize L.*) as a Second Crop in Western Iran / A. Shirkhani [et al.] // *Annals of Biological Research*. 2012. Vol. 3, Issue 9. P. 4307–4312. URL: <https://clck.ru/33T3wm> (дата обращения: 17.09.2022).
8. Corn (*Zea mais L.*) Sowing Quality in the Province of Corrientes, Argentina / O. R. Pozzolo [et al.] // *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. 2020. Vol. 52, Issue 2. P. 111–123. URL: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCFA/article/view/4042> (дата обращения: 17.09.2022).
9. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Распределение семян подсолнечника в рядок в зависимости от скоростных режимов работы пневматического высевающего аппарата // *Техника и оборудование для села*. 2021. № 8. С. 14–17. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-8-14-17>
10. Операция посева – ключевой элемент создания технологий растениеводства шестого технологического уклада / П. В. Лаврухин // *Вестник аграрной науки Дона*. 2021. № 4 (56). С. 24–32. URL: <https://clck.ru/33T49W> (дата обращения: 17.09.2022).
11. Геометрия посева пропашных культур / А. А. Завражнов [и др.] // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 1. С. 59–66. doi: <https://doi.org/10.31857/S2500262722010100>

12. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Обеспечение режимов работы высевающего аппарата специализированным оборудованием // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 6–12. doi: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-6-12>
13. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Новые метод и средство контроля качества работы пневматических высевающих аппаратов точного высева семян // Техника и оборудование для села. 2020. № 1. С. 24–27. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-1-24-27>
14. Должикова Н. Н., Должиков В. В. Качественный посев семян подсолнечника // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 2. С. 86–88. doi: <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-42>
15. Модернизация системы контроля высева семян на пропашных сеялках / А. И. Завражнов [и др.] // Сельский механизатор. 2021. № 7. С. 8–9.
16. Дубина К. П. Оптимизация подачи семян кукурузы дозирующими элементами переменного сечения // Аграрный научный журнал. 2019. № 2. С. 86–91. doi: <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i2pp86-91>
17. Крючин Н. П., Котов Д. Н., Артамонова О. А. Теоретическое исследование процесса перемещения замоченных семян рабочими органами торсионно-штифтового высевающего аппарата // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 2. С. 148–152.
18. Kryuchin N. P., Gorbachev A. P. Improvement of the Technological Process of Sowing Sunflower Seeds with a Pneumatic Seed Planter // IOP Conference Series. 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012136>
19. Основные направления совершенствования сеялок точного высева пропашных культур / А. А. Завражнов [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2022. № 1. С. 7–21. doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-1-7-21>
20. Анализ конструкций пропашных сеялок / В. И. Хижняк [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 4. С. 42–52. URL: <http://vd.achgaa.ru/archive.html>
21. Evaluation of the Efficiency of Row-Crop Seeders using Vacuum and Extrabaric Seed Metering Methods / V. I. Khizhnyak [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
22. Разработка дозирующего модуля сеялки пунктирного высева СПВ-870 / В. И. Хижняк [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 2. С. 27–33. URL: http://xn--80aak3h.xn--p1ai/files/vestnikVD2_2020_50.pdf (дата обращения: 17.09.2022).
23. Markvo I., Zubrilina E., Novikov V. Precise Seeding Planter Concept with Air Pumped Seed-tube // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 126. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600054>
24. Теоретическое исследование процесса дозирования семян с использованием нагнетающего воздушного потока / Хижняк В. И. [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 4. С. 46–54. URL: <http://vd.achgaa.ru/archive.html> (дата обращения: 17.09.2022).
25. Substantiation of Seed Disc Construction for Sowing Seeds / I. N. Krasnov [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Vol. 9, Issue 3. P. 985–996. URL: <http://ачии.пф/files/707f4495-1936-4748-b87d-2d7eafb2b794.pdf> (дата обращения: 17.09.2022).
26. Vacuum Planter's Seed Supply Quality as Affected by the Diameter of Suction Holes / A. Nesmiyan [et al.] // International Review of Automatic Control. 2022. Vol. 15, Issue 2. P. 52–57. doi: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21493>
27. Probabilistic Modeling for Dynamic Processes / A. Nesmiyan // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505019>
28. Пневматический высевающий аппарат : патент 207950 Российская Федерация / Завражнов А. А. [и др.]. № 2021124211 ; заявл. 16.08.2021 ; опубл. 25.11.2021. 4 с.
29. Стенд для испытания высевающих аппаратов сеялок точного высева : патент 2356210 Российская Федерация / Лобачевский П. Я. [и др.]. № 2007143012/12 ; заявл. 20.11.2007 ; опубл. 27.05.2009. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2356210C1_20090527 (дата обращения: 17.09.2022).

Поступила 04.10.2022; одобрена после рецензирования 20.11.2022; принята к публикации 17.01.2023

Об авторах:

Несмиян Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологий и средств механизации агропромышленного комплекса Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, Researcher ID: N-6221-2018, nesmiyan.andrei@yandex.ru

Дубина Константин Павлович, кандидат технических наук, ассистент кафедры технической механики и физики Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>, Researcher ID: GSD-2794-2022, longonor@yandex.ru

Жигайлова Анастасия Павловна, аспирант Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0933>, Researcher ID: GWQ-5701-2022, nastena30.1997@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. Ю. Несмиян – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка задачи исследования, подготовка первоначального варианта текста, формирование частных и общих выводов.

К. П. Дубина – анализ литературных источников, проведение экспериментальных исследований, критический анализ полученных результатов, формирование частных и общих выводов.

А. П. Жигайлова – литературный и патентный анализ данных, проведение экспериментальных исследований, доработка текста, формирование частных и общих выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Orjuela S., Pabon J., Fonseca M. Experimental Assessment of Emissions in Low Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends of Palm and Sunflower Oil. *International Journal on Engineering Applications*. 2021;9(3):128–136. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19810>
2. Bellahkim M.A., Gueraoui K., Mzard A., et al. Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion of Maize Waste: a Case Study. *International Journal on Engineering Applications*. 2021;9(3):173–179. doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19167>
3. Debaeke P., Casadebaig P., Flenet F., Langlade N. Sunflower Crop and Climate Change: Vulnerability, Adaptation, and Mitigation Potential from Case-Studies in Europe. *OCL Oilseeds Fats Crops Lipids*. 2017;24(1). doi: <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
4. Neumann M., Horts E.H., Figueira D.N., et al. Potential of Corn Silage Production in Different Sowing Times in the Paraná Midwest Region. *Applied Research & Agrotechnology*. 2016;9(1):37–44. doi: <https://doi.org/10.5935/PAET.V9.N1.04>
5. Markova N.V. Influence of Sowing Terms and Technological Features of Cultivation on the Formation of Yield and Seed Quality of Hybrids of Sunflower. *Herald of Agrarian Science of Black Sea Region*. 2010;(2):212–218.
6. Baranovsky A.V., Sadovoy A.S., Kapustin S.I., Kapustin A.S. Optimization of Sowing Time for Grain Sorghum and Millet. *Bioscience Research*. 2020;17(2):1121–1128.
7. Shirkhani A., Ahmadi G.H., Mohammadi G., Ghitouli M. Effects of Cropping Architect and Sowing Date on Forage Quantity and Quality of Corn (*Zea Maize L.*) as a Second Crop in Western Iran. *Annals of Biological Research*. 2012;3(9):4307–4312. Available at: <https://clck.ru/33T3wm> (accessed 17.09.2022).
8. Pozzolo O.R., Hidalgo R.J., Domínguez J.F., Giménez L. Corn (*Zea mais L.*) Sowing Quality in the Province of Corrientes, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*. 2020;52(2):111–123. Available at: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCA/article/view/4042> (accessed 17.09.2022).

9. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. Distribution of Sunflower Seeds in a Row Depending on the Speed Modes of Operation of the Pneumatic Dropping Device. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(8):14–17. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-8-14-17>
10. Lavruhin P.V., Kazakova A.S., Medvedko S.N., Ivanov P.A. Seeding Operation – A Key Element of Creation of Crop Technologies of the Sixth Technological Paradigm. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2021;(4):24–32. Available at: <https://clck.ru/33T49W> (accessed 17.09.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Zemlyanov A.A. Geometry of Sowing around Crops. *Rossiiskaia Selskokhoziaistvennaia Nauka*. 2022;(1):59–66. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S2500262722010100>
12. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. Ensuring the Operating Modes of the Seeding Apparatus Specialized Equipment. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021;(4):6–12. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-6-12>
13. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. New Method and Means of Monitoring the Quality of Pneumatic Drilling Mechanism for Precision Seed Sowing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(1):24–27. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-1-24-27>
14. Dolzhikova N.N., Dolzhikov V.V. [Quality Sowing of Sunflower Seeds]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020;(2):86–88. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-42>
15. Zavrazhnov A., Balashov A., Strygin S., et al. [Modernization of the Seeding Control System on Row Crop Seeders]. *Selskii Mehanizator*. 2021;(7):8–9. (In Russ.)
16. Dubina K.P. Optimization of Supply of Corn Seeds by Accurate Accelerating Variable Section. *Agrarian Scientific Journal*. 2019;(2):86–91. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.28983/asj.2019i2pp86-91>
17. Kryuchin N.P., Kotov D.N., Artamonova O.A. [Theoretical Study of the Movement of Soaked Seeds by the Working Bodies of the Torsion-Pin Sowing Machine]. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(2):148–152. (In Russ.)
18. Kryuchin N.P., Gorbachev A.P. Improvement of the Technological Process of Sowing Sunflower Seeds with a Pneumatic Seed Planter. *IOP Conference Series*. 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012136>
19. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Shepelev V.Yu., Yakushev A.V. The Main Directions of Improvement of Precision Seeders of Row Crops. *Bulletin NGIEI*. 2022;(1): 7–21. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-1-7-21>
20. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Taranov V.A., et al. Analysis of the Construction of Massed Seed Drills. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2020;(4):42–52. Available at: <http://vd.achgaa.ru/archive.html> (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Khizhnyak V.I., Shchirov V.V., Nesmiyan A.Yu., et al. Evaluation of the Efficiency of Row-Crop Seeders using Vacuum and Extrabaric Seed Metering Methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;659. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
22. Khizhnyak V.I., Kochergin A.S., Taranov V.A., Onishchenko E.A. Development of Dosing Module of Space Seeding Machine SSM-870. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2020;(2):27–33. Available at: http://xn--80aaak3h.xn--p1ai/files/vestnik/VD2_2020_50.pdf (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Markvo I., Zubrilina E., Novikov V. Precise Seeding Planter Concept with Air Pumped Seedtube. *E3S Web of Conferences*. 2019;126. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600054>
24. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Nesmiyan A.Yu., et al. Theoretical Research of the Process of Dosing Seeds Using an Injection Air Flow. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2021;(4):46–54. Available at: <http://vd.achgaa.ru/archive.html> (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Kapov S.N., et al. Substantiation of Seed Disc Construction for Sowing Seeds. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018;9(3):985–996. Available at: <http://ачии.рф/files/707f4495-1936-4748-b87d-2d7eafb2b794.pdf> (accessed 17.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

26. Nesmiyan A., Khasanov E., Dubina K., Iakupov A. Vacuum Planter's Seed Supply Quality as Affected by the Diameter of Suction Holes. *International Review of Automatic Control*. 2022;15(2):52–57. doi: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21493>
27. Nesmiyan A. Probabilistic Modeling for Dynamic Processes. *E3S Web of Conferences*. 2020;175. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505019>
28. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Brosalin V.G., et al. [Pneumatic Sowing Machine]. Patent 207,950 Russian Federation. 2021 November 25. 4 p. (In Russ.)
29. Lobachevskii P.Ya., Hizhnyak V.I., Nesmiyan A.Yu., Avramenko F.V. [Test Stand For Sowing Units of Precision Air Seeders]. Patent 2,356,210 Russian Federation. 2009 May 27. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2356210C1_20090527 (accessed 17.09.2021). (In Russ.)

Submitted 04.10.2022; revised 20.11.2022; accepted 17.01.2023

About the authors:

Andrey Yu. Nesmiyan, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technology and Means of Mechanization of Agroindustrial Complex, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., 347740 Zernograd, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, Researcher ID: N-6221-2018, nesmiyan.andrei@yandex.ru

Konstantin P. Dubina, Cand.Sci. (Engr.), Assistant of the Chair of Technical Mechanics and Physics, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., 347740 Zernograd, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>, Researcher ID: GSD-2794-2022, longonor@yandex.ru

Anastasiya P. Zhigailova, Postgraduate Student, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., 347740 Zernograd, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0933>, Researcher ID: GWQ-5701-2022, nastena30.1997@mail.ru

Authors contribution:

A. Yu. Nesmiyan – scientific guidance, formulation of the basic concept of research, setting the research objectives, preparation of the initial version of the text, the formation of private and general conclusions.

K. P. Dubina – analysis of literary sources, conducting experimental research, critical analysis of the results, the formation of private and general conclusions.

A. P. Zhigailova – literary and patent data analysis, conducting experimental research, finalizing the text, forming private and general conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.



Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна

А. В. Алешкин¹, С. Ю. Булатов²✉, В. Н. Нечаев²,
С. Л. Низовцев²

¹ Вятский государственный университет
(г. Киров, Российская Федерация)

² Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет
(г. Княгинино, Российская Федерация)

✉ bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Аннотация

Введение. Одним из главных компонентов в рационе сельскохозяйственных животных являются концентрированные корма, которые в России подвергают измельчению молотковыми дробилками. При этом в готовом продукте наблюдается большое содержание пыли, которое можно уменьшить, применяя измельчители с другим принципом измельчения. Предложена конструкция фрезерного измельчителя, в котором разрушение зерна осуществляется резанием.

Цель статьи. Теоретические исследования влияния конструкционных и технологических параметров фрезерного измельчителя на условия движения зерновки по зубу рабочего органа.

Материалы и методы. Теоретическое исследование разработанного измельчителя проводилось с использованием методов усредненного ускорения. Для этого изучалась поверхность зуба рабочего органа.

Результаты исследования. Получены уравнения, описывающие движение частицы по поверхности зуба рабочего органа. Разработана программа, позволяющая облегчить процесс анализа влияния конструкционных и технологических параметров измельчителя на процесс движения частицы по поверхности зуба.

Обсуждение и заключение. Наблюдается прямо пропорциональное уменьшение времени движения частицы по зубу рабочего органа с ростом угловой скорости. В то же время увеличение угла приводит к росту времени нахождения частицы на поверхности зуба. Увеличение значений угловой скорости приводит к снижению перемещения частицы вдоль оси. При угле 45° перемещение вдоль оси в 1,1–1,5 раза меньше, чем при угле 70° . При высоких угловых скоростях перемещение вдоль оси минимально. Из проведенного анализа, учитывая необходимость создания более плавного движения частицы по винтовой линии, следует вывод, что наиболее рациональными будут следующие значения: угол 70° , угловая скорость рабочего органа 185–206 рад/с.

Ключевые слова: концентрированный корм, молотковая дробилка, фрезерный измельчитель, зуб рабочего органа, зерно

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Алешкин А. В., Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Низовцев С. Л., 2023



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

Для цитирования: Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна / А. В. Алешкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 37–51. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

Original article

Substantiation of the Structural and Technological Parameters of the Working Body of the Milling Grain Shredder

A. V. Aleshkin^a, S. Yu. Bulatov^b✉, V. N. Nechaev^b, S. L. Nizovtsev^b

^a Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

^b Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (Knyaginino, Russian Federation)

✉ bulatov_serгей_urevich@mail.ru

Abstract

Introduction. One of the main components in the diet of farm animals is concentrated feed, which in Russia is grinded by shredders. At the same time, in the final product, there is a high dust content, which can be reduced by using grinders with a different principle of grinding. The design of a milling shredder, in which grains are crushed by cutting, is proposed.

Aim of the Article. The article presents theoretical studies of the influence of design and technological parameters of a milling shredder on the conditions of grain motion along the tooth of the working body.

Materials and Methods. The theoretical study of the developed shredder was carried out using averaged acceleration methods. The tooth surface of the working organ was studied.

Results. As a result of theoretical studies, equations describing the motion of a particle along the working body tooth surface were obtained. There has been developed a program to facilitate the process of analyzing the influence of the structural and technological parameters of the shredder on the process of particle motion along the tooth surface.

Discussion and Conclusion. There is a directly proportional decrease in the time of motion of the particle along the working body tooth surface with increasing the angular velocity. At the same time, increasing the angle leads to the increase of the time of the particle along the tooth surface. The increase of angular velocity values leads to decreasing particle displacement along the axis. At the angle of 45° displacement along the axis is 1.1–1.5 times less than at an angle of 70°. At high angular velocities, the moving along the axis is minimal. The analysis, given the need to create a smoother motion of the particle along the helical line, shows that the most rational will be the following values: angle 70° and angular velocity of the working body 185–206 rad/s.

Keywords: concentrated feed, shredder, milling shredder, tooth of the working body, grain

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

For citation: Aleshkin A.V., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovtsev S.L. Substantiation of the Structural and Technological Parameters of the Working Body of the Milling Grain Shredder. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):37–51. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

Введение

В современных условиях на первое место выходит продовольственная безопасность страны. Во многом она зависит от состояния отраслей животноводства и растениеводства. Общеизвестно, что продуктивный потенциал животных и птицы во многом определяется их рационом¹ [1–3]. Одним из главных компонентов рационов сельскохозяйственных животных являются концентрированные корма² [4]. Результаты исследований зарубежных ученых показывают важность использования зерновых в рационах животных, указывая на благоприятный процесс, протекающий в желудке животных при кормлении концентрированными кормами [5–8]. Особую роль среди злаковых отдают ячменю в силу его высокого содержания белка, что важно при кормлении высокопродуктивных животных³ [9; 10]. Установлено, что крупный рогатый скот (КРС) неспособен пережевывать и переваривать зерно в цельном виде [11]. Поэтому его сначала перерабатывают, подвергая разрушению ударом, раздавливанием, разрезанием и т. д.⁴ В США, Австралии и странах ЕС принято зерно подвергать паровой обработке, чтобы повысить его влажность, так как при переработке влажного зерна выделяется меньше пыли⁵ [12–16]. В российских сельскохозяйственных организациях для

разрушения зерна наиболее часто применяют молотковые дробилки с реализованным в них прямым ударом [14–18]. В данном способе есть такие преимущества, как простота исполнения машины, относительно высокая производительность. Однако самым большим недостатком является пылевидная фракция в измельченном зерне [19]. Пыль оказывает негативное влияние на здоровье сельскохозяйственных животных и особенно птицу. Некоторые молотковые дробилки неспособны провести подготовку зерна для кормления птицы таким образом, чтобы оно соответствовало требованиям ГОСТа [20]. В плане равномерности измельчения зерна и малого содержания пылевидной фракции в готовом продукте в более выигрышном положении перед молотковыми дробилками стоят измельчители, в которых реализованы скалывающий и режущий тип разрушения [21]. Предложена конструкция фрезерного измельчителя, в котором разрушение зерна осуществляется резанием [22]. На данном этапе необходимо провести оценку конструкционных и технологических параметров измельчителя.

Цель работы – теоретические исследования влияния конструкционных и технологических параметров фрезерного измельчителя на условия движения зерновки по зубу рабочего органа.

¹ Feed Uses for Barley / J. L. Black [et al.] // Proceedings of the 12th Australian Barley Technical Symposium. Hobart, 2005. URL: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/2648> (дата обращения: 03.12.2022).

² National Research Council: Nutrient Requirements of Beef Cattle. 7th ed. Washington, D.C. : National Academy Press, 2000. URL: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/9791/nutrient-requirements-of-beef-cattle-seventh-revised-edition-update-2000> (дата обращения: 03.12.2022) ; Nikkhah A. Barley Grain for Rumen and Ruminants: Over-Modernized Uses of an Inimitable Fuel // Barley: Production, Cultivation and Uses. Nova Science Publishers, Inc, 2011. P. 247–258. URL: https://www.researchgate.net/publication/285956756_Barley_grain_for_rumen_and_ruminants_Over-modernized_uses_of_an_inimitable_fuel (дата обращения: 03.12.2022).

³ National Research Council...

⁴ Nikkhah A. Barley Grain for Rumen and Ruminants...

⁵ Anderson V., Schroeder J. W. Feeding Barley to Dairy Cattle. Fargo : North Dakota State University Extension Service, 2010. 8 p. URL: https://library.ndsu.edu/ir/bitstream/handle/10365/9318/eb72_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 03.12.2022).

Обзор литературы

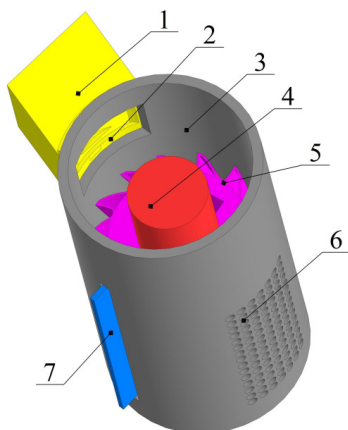
В настоящее время измельчению зерна уделяется большое внимание, и процесс этот достаточно полно изучен [23–26]. Теоретические исследования направлены на изучение степени загрузки дробилки и скоростных характеристик рабочих органов [23; 24]. Интерес представляют теоретические исследования по изучению взаимодействия зерна с рабочими органами и его движения в камере измельчения, так как они лежат в основе проектирования дробилок [27–31]. Современные экспериментальные исследования направлены на определение оптимальных конструкционных и технологических параметров дробилок, проверку теоретических выкладок. В основном изучается влияние конструкционных и режимных параметров дробилок на энергетические показатели [32–35]. Интерес ученых вызывают динамическая устойчивость разрабатываемых дробилок [36; 37]. Часть исследователей уделяют внимание повышению производительности дробилок зерна путем установки различных сепарационных элементов [38]. Большая часть научных работ направлена на изучение традиционных, широко распространенных в России молотковых дробилок с реализованным в них прямым ударом молотка по зерновке. Измельчители зерна, в которых используется скалывание и разрезание, в России не получили такого широкого распространения, как молотковые дробилки. Однако такие устройства обладают существенным преимуществом перед молотковыми – более низкие удельные энергозатраты. О. В. Нанка в своей работе показал, что удельные энергозатраты на измельчение зерна в молотковых дробилках составляют 15–18 кВт·ч/т в то время, как в дисковых измельчителях 8,5–12 кВт·ч/т, а в центробежных 4,5–6,5 кВт·ч/т [39].

Исследователи из Вологодской государственной молочнохозяйственной академии отмечают перспективность применения резания зерновки, выделяя кроме невысоких энергозатрат и такое преимущество способа, как получение готового продукта заданного гранулометрического состава [21]. При этом многочисленными исследованиями рекомендуется применять ножи с малыми углами заточки. Однако В. И. Сыроватка, исследовав процесс динамического резания, рекомендует применять ножи с большим углом заточки (80–85°), отмечая их более высокий ресурс, чем у ножей с малыми углами [40].

Таким образом, очевидны преимущества разрушения зерновок их разрезанием: низкие удельные энергозатраты, выровненный гранулометрический состав.

Материалы и методы

Теоретические исследования проводились для фрезерного измельчителя, трехмерная модель которого представлена на рисунке 1. Устройство представляет собой полый цилиндр, внутри которого на валу 4 вращается рабочий орган (фреза) 5. Через загрузочную горловину 1 и загрузочное окно 2 зерно подается к рабочему органу. Далее зерно по винтовой поверхности зуба фрезы перемещается вниз до момента соприкосновения с противорезом 7. Под действием режущего усилия со стороны зуба фрезы и противореза зерновка разрезается. Также разрезание зерновок осуществляется в области выгрузного окна 6, когда они попадают в отверстия решета, зажимаются и разрезаются зубом фрезы. Разрушенные зерновки выводятся из зоны измельчения через зазор между противорезом и корпусом, а также через отверстия решета. Подробное описание устройства и его работы представлено в другой работе [41].

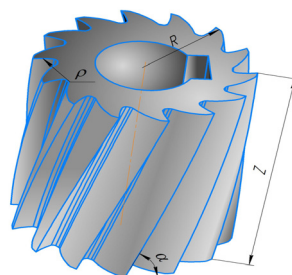


Р и с. 1. Трехмерная модель фрезерного измельчителя зерна: 1 – загрузочная горловина; 2 – загрузочное окно; 3 – цилиндрический корпус; 4 – вал рабочего органа; 5 – рабочий орган; 6 – выгрузное окно с решетом; 7 – противорез

F i g. 1. Three-dimensional model of a milling grain shredder: 1 – loading neck; 2 – loading window; 3 – cylindrical body; 4 – shaft of the working body; 5 – working body; 6 – unloading window with a sieve; 7 – counter-cut

При исследовании рабочего процесса измельчителя важным является изучение условий движения зерновки по поверхности зуба в зависимости от конструктивных и технологических параметров измельчителя. Это позволит не только рассмотреть траекторию движения зерновки и определить наиболее рациональные значения исследуемых параметров, но и создать базу для дальнейших расчетов по определению пропускной способности измельчителя. Теоретическое исследование разработанного измельчителя проводилось с использованием методов усредненного ускорения. Для этого изучалась поверхность зуба рабочего органа (фрезы), трехмерное изображение которой представлено на рисунке 2. На виде сверху она представляет собой дугу радиусом ρ . Между горизонтальной плоскостью и кромкой зуба, представляющей собой винтовую линию, расположенную на боковой поверхности цилиндра, в развертке образован угол α (рис. 2 и 4).

Agricultural engineering



Р и с. 2. Трехмерная модель рабочего органа фрезерного измельчителя зерна

F i g. 2. Three-dimensional model of the working body of a milling grain shredder

Введем оси координат: x_1, y_1, z_1 – связаны жестко с рабочим органом; x_2, y_2, z_2 – поворачивающиеся вокруг и передвигающиеся вдоль оси z_1 . При этом уравнение, описывающее линию контура зуба по осям x_2, y_2, z_2 , неизменно.

Уравнение, описывающее окружность в координатах x_2, y_2 , которые совпадают с координатами x_1, y_1 лишь в начальном сечении ($z_1 = 0$), имеет вид:

$$(x_2 - a)^2 + (y_2 - b)^2 - \rho^2 = 0, \quad (1)$$

где ρ – радиус дуги окружности; a, b – смещение центра дуги окружности относительно начала координат соответственно по осям x_2 и y_2 .

Вогнутая поверхность зуба описывается уравнением полуокружности:

$$y_2 = b - \sqrt{\rho^2 - (x_2 - a)^2}. \quad (2)$$

Оси x_1, y_1, z_1 связаны с рабочим органом, а x_2, y_2, z_2 поворачиваются вокруг z_1 на угол φ , который можно выразить через координату z_1 :

$$\varphi = kz_1, \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от величины угла $\alpha = \text{const}$ и радиуса рабочего органа.

Коэффициент пропорциональности k вычисляется по выражению:

$$k = \frac{1}{R \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}. \quad (4)$$

Изменение координаты z_1 ведет к перемещению осей x_2, y_2, z_2 вдоль нее. Также оси x_2, y_2, z_2 поворачиваются вокруг z_1 таким образом, что дуга, выражаемая уравнением (2), описывает винтовую поверхность в неподвижных координатах x_1, y_1, z_1 :

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \cos(\varphi) - y_2 \sin(\varphi) \\ y_1 = x_2 \sin(\varphi) + y_2 \cos(\varphi) \end{cases}. \quad (5)$$

Выразим x_2, y_2 через координаты x_1, y_1, z_1 . Тогда получим:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos(kz_1) + y_1 \sin(kz_1) \\ y_2 = -x_1 \sin(kz_1) + y_1 \cos(kz_1) \end{cases}. \quad (6)$$

Подставим систему уравнений (6) в выражение (1). Получим уравнение связи между координатами винтовой поверхности с поперечным сечением в виде дуги окружности:

$$f(x_1, y_1, z_1) = (x_1 \cos(kz_1) + y_1 \sin(kz_1) - a)^2 + (-x_1 \sin(kz_1) + y_1 \cos(kz_1) - b)^2 - \rho^2 = 0. \quad (7)$$

На рисунке 3 представлен фрагмент теоретической поверхности, которая построена по выражению (6). По сути это поверхность рассматриваемого зуба

рабочего органа измельчителя, которая построена при известных параметрах ρ и α .

Результаты исследования

Рассмотрим движение частицы по построенной поверхности. Известно, что рабочий орган измельчителя совершает вращательное движение вокруг оси z_1 с угловой скоростью $\bar{\omega}$. В относительном движении частицы по вращающейся построенной поверхности на нее оказывают действие силы тяжести $m\bar{g}$, нормальной реакции \bar{N} , трения $\bar{F}_{\text{тр}}$, инерции Кориолиса $\bar{\Phi}_c$, и переносная центробежная сила инерции $\bar{\Phi}_e$ (рис. 4).

Движение частицы описывается дифференциальным уравнением:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m\bar{g} + \bar{N} + \bar{F}_{\text{тр}} + \bar{\Phi}_e + \bar{\Phi}_c. \quad (8)$$

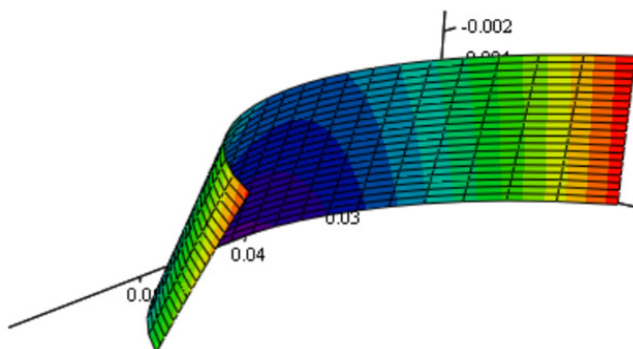
Сила тяжести, действующая на частицу массой m , имеет проекции:

$$m\bar{g} = m\bar{g}(0, 0, -mg),$$

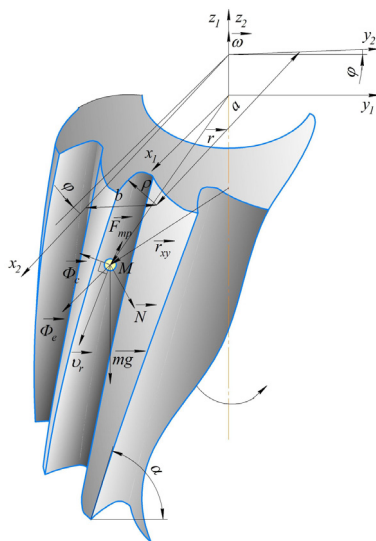
где \bar{g} – ускорение свободного падения.

Нормальная реакция, действующая на частицу со стороны поверхности, в соответствии с уравнениями Лагранжа первого рода в рассматриваемом случае примет вид:

$$\bar{N} = \lambda \cdot \operatorname{grad}(f),$$



Р и с. 3. Расчетная поверхность зуба рабочего органа фрезерного измельчителя
F i g. 3. Calculated tooth surface of the working body of the milling shredder



Р и с. 4. Схема действия сил, влияющих на движение зерновки по зубу рабочего органа фрезерного измельчителя

F i g. 4. Diagram of the forces affecting the movement of the grain along the tooth of the working body of the milling shredder

где λ – неопределенный множитель Лагранжа; $grad(f)$ – вектор-градиент к поверхности по уравнению (7).

Сила трения запишется через закон Кулона:

$$\vec{F}_{\text{тр}} \leq -\mu \left| \vec{N} \right| \frac{\vec{v}_r}{|\vec{v}_r|} = -\mu \left| \lambda \cdot grad(f) \right| \frac{\vec{v}_r}{|\vec{v}_r|}, \quad (9)$$

где μ – коэффициент сухого трения скольжения; \vec{v}_r – относительная скорость частицы.

Модуль относительной скорости рассчитывается по формуле:

$$|\vec{v}_r| = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2}. \quad (10)$$

Переносная центробежная сила инерции $\vec{\Phi}_c$ равна:

$$\vec{\Phi}_c = m\omega^2 \vec{r}_{xy}, \quad (11)$$

где $\vec{r}_{xy} = \vec{r}_{xy}(x_1, y_1, 0)$ – проекция радиус-вектора частицы \vec{r} в относительном движении на плоскость (x_1, y_1) .

Сила инерции Кориолиса $\vec{\Phi}_c$ равна:

$$\vec{\Phi}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}_r,$$

$$\vec{\Phi}_c = -2m \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & \omega \\ \dot{x}_1 & \dot{y}_1 & \dot{z}_1 \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы осей x_1, y_1, z_1 соответственно.

Подставим все силы в правую часть выражения (8) и разделим на массу частицы m . Спроецируем полученное выражение на оси координат. Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{\lambda}{m} \frac{\partial f}{\partial x_1} - \mu \left| \frac{\lambda}{m} \cdot grad(f) \right| \frac{\dot{x}_1}{|\vec{v}_r|} + \omega^2 x_1 + 2\omega \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_1 = \frac{\lambda}{m} \frac{\partial f}{\partial y_1} - \mu \left| \frac{\lambda}{m} \cdot grad(f) \right| \frac{\dot{y}_1}{|\vec{v}_r|} + \omega^2 y_1 - 2\omega \dot{x}_1 \\ \ddot{z}_1 = -g + \frac{\lambda}{m} \frac{\partial f}{\partial z_1} - \mu \left| \frac{\lambda}{m} \cdot grad(f) \right| \frac{\dot{z}_1}{|\vec{v}_r|}. \end{cases} \quad (13)$$

Уравнением связи (7) замыкаем систему уравнений (13). Решение полученной системы уравнений (13) совместно с (7) проводили численно методом усредненного ускорения, задаваясь пятью итерациями на каждом шаге интегрирования.

Проекции абсолютной скорости на вращающиеся оси вычисляются после определения относительных по выражениям:

$$\begin{cases} v_{ax} = \dot{x}_1 - \omega y_1 \\ v_{ay} = \dot{y}_1 + \omega x_1 \\ v_{az} = \dot{z}_1. \end{cases} \quad (14)$$

В среде MSVisualStudio на языке C# составлена программа для расчета искомых параметров в соответствии с изложенным алгоритмом.

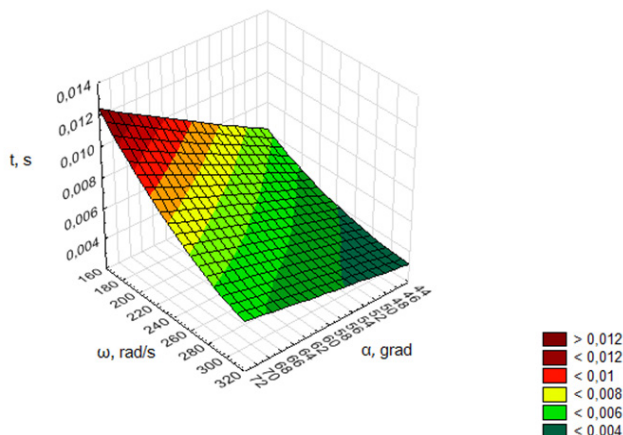
Был проведен анализ движения зерновки в разработанной программе. При расчете принимались следующие значения: минимальная угловая скорость рабочего органа $\omega_{\min} = 185 \text{ c}^{-1}$ (минимальное критическое значение, при котором реализуется работа измельчителя и не происходит его остановки вследствие

забивания зерном), максимальная угловая скорость рабочего органа $\omega_{\max} = 311 \text{ c}^{-1}$ (соответствует максимальной частоте вращения вала электродвигателя 2 970 мин⁻¹), минимальное и максимальное значение углов наклона зуба $\alpha_{\min} = 45^\circ$ и $\alpha_{\max} = 90^\circ$. Изменение значений угла α обусловлено условиями производства фрез. В результате расчетов построены графики (рис. 5 и 6).

Обсуждение и заключение

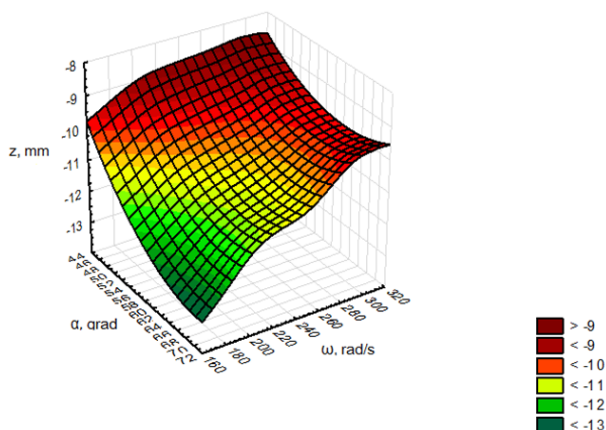
Анализ графиков, представленных на рисунке 5, показывает прямо пропорциональное уменьшение времени движения частицы по зубу рабочего органа с ростом угловой скорости. В то же время увеличение угла α приводит к росту времени нахождения частицы на поверхности зуба. В исследуемом диапазоне оно возрастает в 1,7 раза.

Увеличение значений угловой скорости приводит к снижению перемещения частицы вдоль оси z (рис. 6). При $\omega_{\min} = 185 \text{ рад/с}$ z находится в диапазоне 9,5–12,5 мм в зависимости от угла α , а при $\omega_{\max} = 311 \text{ рад/с}$ – 8,5–10,5 мм. При $\alpha = 45^\circ$ перемещение вдоль оси z в 1,1–1,5 раза меньше, чем при $\alpha = 70^\circ$.



Р и с. 5. Изменение времени движения зерновки по зубу в зависимости от угла его наклона и угловой скорости рабочего органа фрезерного измельчителя

F i g. 5. Change in the time of movement of the grain along the tooth depending on the angle of its inclination and the angular velocity of the working body of the milling shredder



Р и с. 6. Изменение величины перемещения зерновки вдоль оси z в зависимости от угла наклона зуба и угловой скорости рабочего органа фрезерного измельчителя

Fig. 6. Change in the amount of grain movement along the z axis depending on the angle of inclination of the tooth and the angular velocity of the working body of the milling shredder

При высоких угловых скоростях перемещение вдоль оси z минимально. Это свидетельствует о том, что частица быстро достигает корпуса измельчителя и далее движется по траектории, близкой к окружности. Малые углы, независимо от угловой скорости, способствуют быстрому перемещению частицы в низ корпуса, что создает неблагоприятные условия проходу частицы сквозь решето. Из проведенного анализа, учитывая

необходимость создания такого движения частицы, при котором она будет как можно дольше двигаться по поверхности решета по винтовой линии, следует вывод, что наиболее рациональными будут следующие значения: $\alpha = 70^\circ$, $\omega = 185\text{--}206$ рад/с. Результаты проведенных исследований послужат базой для дальнейших расчетов, направленных на определение производительности измельчителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikkhah A. Barley Grain for Ruminants: a Global Treasure or Tragedy // Journal of Animal Science and Biotechnology. 2012. Vol. 3, Issue 1. doi:<https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-22>
2. Nikkhah A. Optimizing Barley Grain Use by Dairy Cows: A Betterment of Current Perceptions // Progress in Food Science and Technology. 2011. Vol. 1. P. 165–178.
3. Processing Oats Grain for Cull Cows Finished in Feedlot Processamento Do Grão De Aveia Para Alimentação De Vacas De Descarte Terminadas Em Confinamento / J. Restle [et al.] // Ciência Animal Brasileira. 2009. Vol. 10, Issue 2. P. 497–503. URL: <https://doaj.org/article/018feb12ab5748b58e26ba8508289daa> (дата обращения: 03.12.2022).
4. Nikkhah A. Postmodern Management of Starchy Grains for Ruminants: a Barley Grain Perspective // Russian Agricultural Sciences. 2012. Vol. 38. P. 14–21. doi: <https://doi.org/10.3103/S106836741201017X>
5. Effect of Grains Differing in Expected Ruminant Fermentability on the Productivity of Lactating Dairy / C. Silveira [et al.] // Journal of Dairy Science. 2007. Vol. 90. P. 2852–2859. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2006-649>
6. Lehmann M., Meeske R. Substituting Maize Grain with Barley Grain in Concentrates Fed to Jersey Cows Grazing Kikuyu-Ryegrass Pasture // South Afr J Anim Sci. 2006. Vol. 36, Issue 3. P. 175–180.

7. Mixtures of Wheat and High-Moisture Corn in Finishing Diets: Feedlot Performance and in Situ Rate of Starch Digestion in Steers / B. J. Bock [et al.] // *Journal of Animal Science*. 1991. Vol. 69, Issue 7. P. 2703–2710. doi: <https://doi.org/10.2527/1991.6972703x>

8. Feeding Combinations of Dry Corn and Wheat to Finishing Lambs and Cattle / R. Kreikemeier [et al.] // *Journal of Animal Science*. 1987. Vol. 65. P. 1647–1654. doi: <https://doi.org/10.2527/jas1987.6561647x>

9. Boss D. L., Bowman J. G. Barley Varieties for Finishing Steers: I. Feedlot Performance, in Vivo Diet Digestion, and Carcass Characteristics // *Journal of Animal Science*. 1996. Vol. 74, Issue 6. P. 1967–1972. doi: <https://doi.org/10.2527/1996.7481967x>

10. Van Barneveld R. J. Chemical and Physical Characteristics of Grains Related to Variability in Energy and Amino Acid Availability in Pigs: A Review // *Australian Journal of Agricultural Research*. 1999. Vol. 50, Issue 5. P. 667–687. URL: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/1975> (дата обращения: 03.12.2022).

11. Valentine S. C., Wickes R. B. The Production and Composition of Milk from Dairy Cows Fed Hay Supplemented with Whole, Rolled or Alkali Treated Barley Grain // *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*. 1980. Vol. 13. P. 397–400. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19820475140> (дата обращения: 03.12.2022).

12. Yang W. Z., Beauchemin K. A., Rode L. M. Effects of Barley Grain Processing on Extent of Digestion and Milk Production of Lactating Cows // *Journal of Dairy Science*. 2000. Vol. 83, Issue 3. P. 554–568. doi: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74915-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74915-0)

13. Zinn R. A. Influence of Processing on the Comparative Feeding Value of Barley for Feedlot Cattle // *Journal of Animal Science*. 1993. Vol. 71, Issue 1. P. 3–10. doi: <https://doi.org/10.2527/1993.7113>

14. Modal Analysis and Acoustic Noise Characterization of a Grain Crusher / W. Tanaś [et al.] // *Ann Agric Environ Med*. 2018. Vol. 25, Issue 3. P. 433–436. doi: <https://doi.org/10.26444/aaem/87154>

15. Яровой М. Н. Молотковая дробилка для фуражного зерна с конусным сепаратором // *Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции*. 2021. № 2. С. 97–101. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47620637> (дата обращения: 03.12.2022).

16. Обоснование конструкции молотковой дробилки с возможностью регулирования параметров искусственно создаваемой рабочей атмосферы / Ф. А. Киприянов [и др.] // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2021. № 4. С. 76–82. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/316553> (дата обращения: 03.12.2022).

17. Исаков Р. М., Исенов С. С., Заичко Г. А. Системный анализ ударно-раскалывающего измельчения в молотковой дробилке // *Труды университета*. 2021. № 3. С. 54–60. doi: https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_3_54

18. Nitrogening Hammers of the Grain Crusher of the Aknar Poultry Factory / V. S. Portnov [et al.] // *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021. Vol. 1, Issue 1. P. 9–13. doi: https://doi.org/10.52209/2706-977X_2021_1_9

19. Ширококов В. И., Федоров О. С., Ипатов А. Г. Анализ качества измельченного зерна при использовании дробилок открытого и закрытого типов // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 2. С. 69–74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41207668> (дата обращения: 03.12.2022).

20. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Шамин А. Е. Результаты оценки качества измельчения зерновых дробилкой ДЗМ-6 // *Вестник НГИЭИ*. 2020. № 3. С. 21–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42593981> (дата обращения: 03.12.2022).

21. Острцов В. Н., Сухляев В. А. Исследование энергосберегающего метода разрушения зерна // *Молочнохозяйственный вестник*. 2013. № 1. С. 29–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19427901> (дата обращения: 03.12.2022).

22. Фрезерный измельчитель зерна / А. Г. Сергеев [и др.] // *Сельский механизатор*. 2022. № 5. С. 14–15. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48700167> (дата обращения: 03.12.2022).

23. Садов В. В., Сорокин С. А. Повышение эффективности измельчения зерновых компонентов за счет оптимальной загрузки молотковой дробилки // *Вестник Алтайского государственного*

аграрного университета. 2021. № 3. С. 100–106. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45155254> (дата обращения: 03.12.2022).

24. Прейс В. В., Журавлев А. А. Обоснование рационального скоростного режима работы молотковой дробилки по критерию удельной энергоёмкости процесса измельчения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 6. С. 23–28. URL: <https://clck.ru/33VD8q> (дата обращения: 03.12.2022).

25. Ben-Nun O., Einav I. The Role of Self-Organization during Confined Comminution of Granular Materials // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2010. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0205>

26. Kurbonov N., Kholdarova G. Researches on Work Quality Indicators of Grain Grinder-Crusher for Farmers // Universum: технические науки. 2022. № 7. С. 25–27. URL: <https://clck.ru/33U58G> (дата обращения: 03.12.2022).

27. Керженцев В. А., Перова Н. В. Математическое моделирование процесса измельчения сыпучего продукта по структурным составляющим молотковой дробилки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2022. Т. 9, № 1–2. С. 54–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417911> (дата обращения: 03.12.2022).

28. Яровой М. Н., Дружинин Р. А., Корнев А. С. Теоретические основы определения энергии перемещения кольцевого слоя в молотковой дробилке // АгроЭкоИнфо. 2022. № 2. doi: <https://doi.org/10.51419/202122222>

29. Керженцев В. А., Перова Н. В. Особенности структуры молотковой дробилки, определяемые по моделирующим функциям процесса измельчения пищевых смесей // Актуальные проблемы в машиностроении. 2022. Т. 9, № 1–2. С. 38–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417909> (дата обращения: 03.12.2022).

30. Бесподенов Р. В. Анализ работы молотковых дробилок на основании теории размерности // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 2. С. 42–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48089638> (дата обращения: 03.12.2022).

31. Бесподенов Р. В. Диссипация энергии в конструктивных элементах молотковой зернодробилки // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 73–77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46467211> (дата обращения: 03.12.2022).

32. О выборе рациональных параметров молотковой дробилки с монолитным молотком / М. Б. Балданов [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 1. С. 55–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42622809> (дата обращения: 03.12.2022).

33. Яровой М. Н., Корнев А. С., Дружинин Р. А. Влияние окружной скорости молотков и диаметра рабочей камеры на величину эффективной мощности молотковой дробилки // АгроЭкоИнфо. 2022. № 2. doi: <https://doi.org/10.51419/202122235>

34. Чехунов О. А., Воронин В. В., Ворохобин А. В. Определение основных конструктивно-режимных параметров молотковой зернодробилки для фуражного зерна // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 2. С. 45–56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46334381> (дата обращения: 03.12.2022).

35. Вендин С. В., Саенко Ю. В., Семернина М. А. Дробилка для зерна с комбинированной дробильной камерой // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 1. С. 27–39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45684596> (дата обращения: 03.12.2022).

36. Федоренко И. Я. Колебания и динамическая устойчивость молотков зернодробилок // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 4. С. 98–107. doi: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-210-4-98-107>

37. Федоренко И. Я. Динамические свойства молотковой зернодробилки с вертикальным расположением барабана // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 89–95. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44908773> (дата обращения: 03.12.2022).

38. Повышение производительности дробилки зерна за счет улучшения сепарации / А. А. Петров [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 3. С. 159–162. doi: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162>

39. Нанка О. В. Способы механического воздействия при измельчении фуражного зерна и их энергетическая оценка // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1. С. 204–209. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22751524> (дата обращения: 03.12.2022).
40. Сыроватка В. И., Сергеев Н. С. Исследование процесса динамического резания семян рапса и фуражного зерна // Вестник «МГАУ». 2008. № 1. С. 54–59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10365958> (дата обращения: 03.12.2022).
41. Измельчитель сыпучих продуктов : патент 2737143 Российская Федерация / Миронов К. Е., Низовцев С. Л. № 2020108480 ; заявл. 26.02.2020 ; опубл. 25.11.2020. 4 с.

Поступила 06.12.2022; одобрена после рецензирования 26.12.2022; принята к публикации 29.12.2022

Об авторах:

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

Булатов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, Researcher ID: ABC-3577-2020, bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Нечаев Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технических и биологических систем Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>, Researcher ID: ABC-4742-2021, nechaev-v@list.ru

Низовцев Сергей Леонидович, доктор технических наук, аспирант Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), 9910250@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

- А. В. Алешкин – разработка теоретических предпосылок, написание программы.
С. Ю. Булатов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, осуществление критического анализа и доработка текста.
В. Н. Нечаев – подготовка начального варианта статьи, оформление графического материала, анализ полученных результатов.
С. Л. Низовцев – формулирование цели исследований, проведение обзора литературных источников.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Nikkhah A. Barley Grain for Ruminants: a Global Treasure or Tragedy. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2012;3(1). doi:<https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-22>
2. Nikkhah A. Optimizing Barley Grain Use by Dairy Cows: A Betterment of Current Perceptions. *Progress in Food Science and Technology*. 2011;1:165–178.
3. Restle J., Faturi C., Pascoal L.L., et al. Processing Oats Grain for Cull Cows Finished in Feedlot Processamento Do Grão De Aveia Para Alimentação De Vacas De Descarte Terminadas Em Confinamento. *Ciência Animal Brasileira*. 2009;10(2):497–503. Available at: <https://doaj.org/article/018feb12ab5748b58e26ba8508289daa> (accessed 03.12.2022).
4. Nikkhah A. Postmodern Management of Starchy Grains for Ruminants: a Barley Grain Perspective. *Russian Agricultural Sciences*. 2012;38:14–21. doi: <https://doi.org/10.3103/S106836741201017X>

5. Silveira C., Oba M., Beauchemin K.A., Helm J. Effect of Grains Differing in Expected Ruminant Fermentability on the Productivity of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2007;90:2852–2859. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2006-649>
6. Lehmann M., Meeske R. Substituting Maize Grain with Barley Grain in Concentrates Fed to Jersey Cows Grazing Kikuyu-Ryegrass Pasture. *South Afr J Anim Sci*. 2006;36(3):175–180.
7. Bock B.J., Brandt R.T., Harmon D.L., et al. Mixtures of Wheat and High-Moisture Corn in Finishing Diets: Feedlot Performance and in Situ Rate of Starch Digestion in Steers. *Journal of Animal Science*. 1991;69(7):2703–2710. doi: <https://doi.org/10.2527/1991.6972703x>
8. Kreikemeier R., Stock R.A., Brink D.R., Britton R.A. Feeding Combinations of Dry Corn and Wheat to Finishing Lambs and Cattle. *Journal of Animal Science*. 1987;65:1647–1654. doi: <https://doi.org/10.2527/jas1987.6561647x>
9. Boss D.L., Bowman J.G. Barley Varieties for Finishing Steers: I. Feedlot Performance, in Vivo Diet Digestion, and Carcass Characteristics. *Journal of Animal Science*. 1996;74(6):1967–1972. doi: <https://doi.org/10.2527/1996.7481967x>
10. Van Barneveld R.J. Chemical and Physical Characteristics of Grains Related to Variability in Energy and Amino Acid Availability in Pigs: A review. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1999;50(5):667–687. Available at: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/1975> (accessed 03.12.2022).
11. Valentine S.C., Wickes R.B. The Production and Composition of Milk from Dairy Cows Fed Hay Supplemented with Whole, Rolled or Alkali Treated Barley Grain. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*. 1980;13:397–400. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19820475140> (accessed 03.12.2022).
12. Yang W.Z., Beauchemin K.A., Rode L.M. Effects of Barley Grain Processing on Extent of Digestion and Milk Production of Lactating Cows. *Journal of Dairy Science*. 2000;83(3):554–568. doi: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74915-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74915-0)
13. Zinn R.A. Influence of Processing on the Comparative Feeding Value of Barley for Feedlot Cattle. *Journal of Animal Science*. 1993;71(1):3–10. doi: <https://doi.org/10.2527/1993.7113>
14. Tanaś W., Szczepaniak J., Kromulski J., et al. Modal Analysis and Acoustic Noise Characterization of a Grain Crusher. *Ann Agric Environ Med*. 2018;25(3):433–436. doi: <https://doi.org/10.26444/aaem/87154>
15. Yarovoj M.N. Hammer Crusher for Feed Grain with Cone Separator. *Tekhnologii i tovarovedenie sel'skokhozyaystvennoy produkcii*. 2021;(2):97–101. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47620637> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Kipriyanov F.A., Palitsyn A.V., Sukhlyayev V.A., Belozherov S.A. [Rationale for the Design of a Hammer Crusher with the Ability to Regulate the Parameters of the Artificially Created Working Atmosphere]. *Vestnik APK Verkhnevolzhya*. 2021;(4):76–82. Available at: <https://e.lanbook.com/journal/issue/316553> (accessed 03.12.2022). (In Russ.)
17. Iskakov R.M., Isenov S.S., Zaichko G.A. System Analysis of Impact-Splitting Grinding in a Hammer Mill. *Trudy universiteta*. 2021;(3):54–60. (In Russ., abstract in Eng.) doi: https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_3_54
18. Portnov V.S., Yurov V.M., Makhanov K.M., et al. Nitrogening Hammers of the Grain Crusher of the Aknar Poultry Factory. *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021;1(1):9–13. doi: https://doi.org/10.52209/2706-977X_2021_1_9
19. Shirobokov V.I., Fyodorov O.S., Ipatov A.G. Analysis of Crushed Grain Quality When Using Crushers of Open and Closed Types. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2019;(2):69–74. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41207668> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Shamin A.E. Results of Evaluation of the Quality of Grain Crushing by the DZM-6 Crusher. *Vestnik NGIEI*. 2020;(3):21–36. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42593981> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Ostretsov V.N., Sukhlyayev V.A. Seed Cleaving Energy-Saving Method Research. *Molochnokhozaystvennyy vestnik*. 2013;(1):29–36. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19427901> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

22. Sergeev A.G., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovcev S.L. Milling Grain Shredder. *Selskiy mekhanizator*. 2022;(5):14–15. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48700167> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Sadov V.V., Sorokin S.A. Increasing the Grinding Efficiency of Grain Components by Optimal Loading of the Hammer Crusher. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(3):100–106. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45155254> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Preys V.V., Zhuravlev A.A. Rationale High-Speed Mode of Operation of the Hammer Crusher According to the Criterion of the Energy Intensity of the Grinding Process. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020;(6):23–28. Available at: <https://elck.ru/33VD8q> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Ben-Nun O., Einav I. The Role of Self-Organization during Confined Comminution of Granular Materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2010. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0205>
26. Kurbonov N., Kholdarova G. Researches on Work Quality Indicators of Grain Grinder-Crusher for Farmers. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022;(7):25–27. Available at: <https://elck.ru/33U58G> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
27. Kerzhentsev V.A., Perova N.V. Mathematical Modeling of the Process Grinding of Bulk Food Product on Structural Components of a Hammer Crusher. *Aktualnye problemy v mashinostroenii*. 2022;9(1–2):54–61. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417911> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
28. Yarovoy M.N., Druzhinin R.A., Kornev A.S. [Theoretical Basis for Determining the Displacement Energy of an Annular Layer in a Hammer Crusher]. *AgroEkoInfo*. 2022;(2). (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.51419/202122222>
29. Kerzhentsev V.A., Perova N.V. Structural Features of Hammer Crusher, Determined by Modeling Functions of Food Grinding Processes. *Actual Problems in Machine Building*. 2022;9(1–2):38–46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417909> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
30. Bospoldenov R.V. Analysis of Hammer Crusher Operation Based on the Dimension Theory. *Vestnik molodezhnoy nauki Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(2):42–46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48089638> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
31. Bospoldenov R.V. Energy Dissipation in Structural Elements of a Hammer Grain Crusher. *Vestnik molodezhnoy nauki Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(1):73–77. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46467211> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
32. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Konovalov V.I., Konovalova A.A. On the Choice of Rational Parameters of a Hammer Mill with a Monolithic Hammer. *Vestnik VSGUTU*. 2020;(1):55–60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42622809> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
33. Yarovoy M.N., Kornev A.S., Druzhinin R.A. [Influence of Peripheral Speed of Hammers and Diameter of the Working Chamber on the Value of Effective Power of Hammer Crusher]. *AgroEkoInfo*. 2022;(2). (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.51419/202122235>
34. Chekhunov O.A., Voronin V.V., Vorokhobin A.V. Plant for Preparation of Fertilizer Solution. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*. 2021;(2):45–56. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46334381> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
35. Vendin S.V., Saenko Yu.V., Semernina M.A. Grain Crusher with Combined Crushing Chamber. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*. 2021;(1):27–39. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45684596> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
36. Fedorenko I.Ya. [Fluctuations and Dynamic Stability of Grain Crusher Hammers]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;(4):98–107. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-210-4-98-107>
37. Fedorenko I.Ya. The Dynamic Properties of Hammer Grain Crusher with Vertical Drum Position. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(1):89–95. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44908773> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)



38. Petrov A.A., Shakhov V.A., Naumov D.V. Increasing the Productivity of the Grain Crusher Due to Improved Separation. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(3):159–162. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162>

39. Nanka O.V. [Methods of Mechanical Action in the Grinding of Feed Grain and Their Energy Assessment]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2014;(1):204–209. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22751524> (accessed 03.12.2022). (In Russ.)

40. Syrovatka V.I., Sergeev N.S. [Study of Dynamic Cutting Process of Rapeseed and Forage Grain]. *Vestnik MGAU*. 2008;(1):54–59. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10365958> (accessed 03.12.2022). (In Russ.)

41. Mironov K.Ye., Nizovtsev S.L. [Bulk Food Grinder]. Patent 2,737,143 Russian Federation. 2020 November 25. 4 p. (In Russ.)

Submitted 06.12.2022; revised 26.12.2022; accepted 29.12.2022

About the authors:

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

Sergey Yu. Bulatov, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technical Service, Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, Researcher ID: ABC-3577-2020, bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Vladimir N. Nechaev, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Technical and Biological Systems, Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>, Researcher ID: ABC-4742-2021, nechaev-v@list.ru

Sergey L. Nizovtsev, Dr.Sci. (Engr.), Postgraduate Student, Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), 9910250@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Aleshkin – developing the theoretical background, writing the program.

S. Yu. Bulatov – scientific guidance, formulation of the main directions of research, critical analysis and revision of the text.

V. N. Nechaev – preparation of the initial version of the article, design of graphic material, analysis of the results.

S. L. Nizovtsev – formulating the purpose of the research, conducting a review of literary sources.

All authors have read and approved the final manuscript.



Повышение урожайности и качества зерна озимой пшеницы за счет применения инновационных удобрений и сельхозмашин

В. А. Милюткин¹✉, В. А. Овчинников²

¹ Самарский ГАУ (г. Кинель, Российская Федерация)

² Национальный исследовательский Мордовский

государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

✉ oiapp@mail.ru

Аннотация

Введение. Статья посвящена исследованию оптимизации процесса применения жидких азотных минеральных удобрений на основе карбамидно-аммиачной смеси как в серийном виде КАС-32, так и в инновационном КАС+S (с добавлением мезоэлемента серы S) в качестве подкормки озимой пшеницы весной в период кушения. Процесс внесения осуществляли поверхностно по посевам с крупнокапельными форсунками серийным штанговым опрыскивателем «Туман-2» и инжекторно-инновационным агрегатом мультиинжектором «Туман-2М».

Цель статьи. Обосновать рациональные технологии с основными составляющими эффективного применения КАС на основных видах сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы. В процессе исследования использованы общепринятая методика полевого опыта, ОСТы и ГОСТы на испытания машин для внесения удобрений. В качестве объектов исследований были приняты жидкие азотные минеральные удобрения КАС-32 и КАС+S производства ПАО «КуйбышевАзот», которые вносились опрыскивателями «Туман-2» и «Туман-2М» предприятия ООО «Пегас-Агро».

Результаты исследования. Проведенные Самарским ГАУ полевые сравнительные испытания инновационных технологий применения КАС показали увеличение урожайности озимой пшеницы сорта Базис до 59,9 %, по сравнению с вариантом обработки посевов аммиачной селитрой. Кроме того, применение КАС+S повышает классность пшеницы по белку с III до I класса, по клейковине – с III до II класс.

Обсуждение и заключение. Жидкие минеральные удобрения КАС имеют преимущество, по сравнению с аммиачной селитрой, особенно в засушливые годы, что весьма актуально в условиях прогнозируемого глобального потепления. Полученные результаты имеют большое значение для широкого внедрения данной инновационной технологии в АПК.

Ключевые слова: озимая пшеница, азотные удобрения, жидкие удобрения, КАС-32, КАС+S, опрыскиватель, мультиинжектор, Туман-2, Туман-2М

Благодарности: исследования проведены при финансовой поддержке Самарских предприятий ПАО «КуйбышевАзот», ООО «Пегас-Агро», с участием Министерства сельского хозяйства и продовольствия Самарской области.



Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Милюткин В. А., Овчинников В. А. Повышение урожайности и качества зерна озимой пшеницы за счет применения инновационных удобрений и сельхозмашин // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 52–67. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>

Original article

Increasing the Yield and Quality of Winter Wheat Grain through the Use of Innovative Fertilizers and Agricultural Machinery

V. A. Milyutkin^a✉, V. A. Ovchinnikov^b

^a Samara State Agrarian University (Kinel, Russian Federation)

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

✉ oiapp@mail.ru

Abstract

Introduction. The article deals with the study of optimizing the process of using liquid nitrogen mineral fertilizers based on a carbamide-ammonia mixture, both in the serial form of CAS-32 and in the innovative CAS+S (with the addition of a mesoelement-sulfur-S), as a top dressing for winter wheat during tillering in spring. The dressing process was carried out superficially on crops with a serial rod sprayer Tuman-2 with large-drop nozzles and an innovative multi-injector unit Tuman-2M.

Aim of the Article. The article aims at justifying rational technologies with the main components of the effective application of CAS on the main types of crops.

Materials and Methods. In the course of the study, there were used a common methodology of field experience, OST and GOST standards for testing machines for fertilization. Liquid nitrogen mineral fertilizers CAS-32 and CAS+S produced by PJSC KuibyshevAzot and taken as objects of research were introduced by sprayers Tuman-2 and Tuman-2M manufactured by the company Pegas-Agro LLC.

Results. The field comparative tests of innovative technologies for the use of CAS conducted by Samara State Agrarian University showed an increase in the yield of the winter wheat variety Basis to 59.9% compared with the option of dressing crops with ammonium nitrate. In addition, the use of CAS+S increases the class of wheat in protein from class III to class I, in gluten from class III to class II.

Discussion and Conclusion. In general, liquid mineral fertilizers of CAS have an advantage over ammonium nitrate, especially in dry years that is very topical in the conditions of predicted global warming. The results obtained are of great importance for the wider introduction of this innovative technology in the agro-industrial complex.

Keywords: winter wheat, nitrogen fertilizers, liquid fertilizers, CAS-32, CAS+S, sprayer, multi-injector, Tuman-2, Tuman-2M

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Samara enterprises PJSC KuibyshevAzot, LLC Pegas-Agro with the participation of the Ministry of Agriculture and Food of the Samara Region.

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

For citation: Milyutkin V.A., Ovchinnikov V.A. Increasing the Yield and Quality of Winter Wheat Grain through the Use of Innovative Fertilizers and Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):52–67. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>

Введение

Современное сельское хозяйство обеспечивает население продовольствием. Оно должно быть разнообразным и качественным. К сожалению, проблема дефицита продовольствия актуальна, и она усугубляется. Российская Федерация, располагая значительными земельными ресурсами, эффективно реформировав агропромышленный комплекс, становится одной из ведущих стран по производству продуктов питания как для собственного населения, так и для экспорта. Существенным фактором, обеспечивающим производство сельскохозяйственной продукции в требуемом количестве, является сохранение и приумножение плодородия почв, что в настоящее время обеспечивается не в полной мере. Для этого отечественной и мировой наукой разрабатываются интенсивные технологии с использованием инновационных агрохимических (исследовались удобрения ПАО «Куйбышев-Азот») и технических средств (система машин «Туман» ООО «Пегас-Агро») для эффективного их применения. По заключению основателя отечественной агрохимии Д. Н. Прянишникова, «главным условием, определяющим среднюю высоту урожая в разные эпохи, является степень обеспеченности сельскохозяйственных культур азотом» [1].

Наряду с традиционно применяемыми в сельском хозяйстве твердыми азотными удобрениями, большое распространение в мире получает жидкое удобрение на основе карбамида-аммиачной смеси (КАС), особенно для засушливых условий и прогнозируемого глобального потепления¹ [1–3]. КАС как вид жидкого азотного удобрения был запатентован в США в марте 1984 года. Карбамида-аммиачная смесь сейчас успешно применяется в Европе, США, Австралии и других странах мира для выращивания злаков, фруктов, технических культур.

В связи с интенсивным распространением КАС в России в ряд регионов на юге и севере, отечественная химическая промышленность, компании «Акрон», «ЕвроХим», «КуйбышевАзот» и «СДС Азот», поставляет более 3,5 млн т КАС-32 для 35 млн га сельскохозяйственных угодий при среднем расходе в 100 кг/га по различным технологиям его внесения.

В значительной степени проблема сохранения и повышения плодородия почв связана со всесторонним изучением КАС, требующим особых технологий и технических средств при применении² [4; 5].

Цель исследования – обоснование рациональных технологий с основными составляющими эффективного применения

¹ Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий нечерноземной зоны Российской Федерации до 2030 года / А. Л. Иванов [и др.] // Версия 2.0. Москва, 2021. 400 с. URL: <https://new.ras.ru/staff/akademiki/ivanov-andrey-leonidovich/> (дата обращения: 03.12.2022).

² Сычев В. Г., Ефремов Е. Н. Агрохимия в решении задач продовольственной безопасности // Агрохимия в XXI веке : мат-лы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. 2018. С. 34–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41241642&ppf=1> (дата обращения: 03.12.2022); Сычев В. Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М. : РАН, 2019. 324 с.; Сычев В. Г. Перспективы использования новых агрохимикатов в современных агротехнологиях // Перспективы использования инновационных форм удобрений, средств защиты и регуляторов роста растений в агротехнологиях сельскохозяйственных культур : мат-лы докладов участников науч.-практич. конф. 2018. С. 3–6. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35437695> (дата обращения: 03.12.2022); Сычев В. Г., Алиев А. М., Цимбалест Н. И. Влияние средств химизации в технологиях возделывания озимой пшеницы на зависимость между урожайностью зерна и энергетической эффективностью // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. : мат-лы Всерос. координационного совещания научных учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями. 2018. С. 278–286. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35672882&ppf=1> (дата обращения: 03.12.2022).

КАС на основных видах сельскохозяйственных культур.

Обзор литературы

В своих исследованиях ученые Самарского ГАУ основывались на результатах исследований по оптимизации технологий применения КАС различного состава на сельскохозяйственных культурах³ [4–6]. При этом учитывали коэффициент использования азота минеральных удобрений растениями и его регулирование [1], оценку влияния жидких комплексных удобрений на урожайность зерна озимой пшеницы [2], агроэкономическую оценку применения жидких азотных удобрений в сельском хозяйстве⁴, разработки по интеллектуальным машинным технологиям и технике для реализации государственной программы развития сельского хозяйства [3], расход ресурсов биологического азота в земледелии России [4], сравнительную оценку жидких азотных и азотсераосодержащих удобрений на базе КАС, по сравнению с твердыми минеральными удобрениями⁵, алгоритм оценки и выбора машинных технологий с учетом показателей экологической устойчивости сельских территорий [5], инновационную технику и технологии применения жидких удобрений КАС в регионах с недостаточным увлажнением при прогнозируемом глобальном потеплении [6–10].

По имеющейся информации и проведенному научному обзору определено главное – жидкие азотные минеральные удобрения КАС имеют существенное положительное влияние на развитие, урожайность и качество ликвидных возделываемых сельскохозяйственных культур. При этом КАС

- дешевый и прост в производстве;
- безопасный при перевозках, хранении и использовании;

– в отличие от других видов азотных солей, используемых в сельском хозяйстве, не взрывается, менее опасен для здоровья;

– универсальный (КАС широко используется для внесения в почву и внекорневой подкормки, что особенно важно для влажных местностей, где азот легко вымывается из почвы);

– долго действует (в смеси азот содержится в трех видах, из которых четверть (ионы NO_3) сразу доступна для поглощения растениями, также доступна для усвоения другая четверть – ионы NH_4 , которая быстро может перерабатываться почвенными нитрифицирующими бактериями в нитраты NO_3 ; оставшаяся половина общего количества азота постепенно превращается под воздействием почвенных энзимов в NH_4 , а затем в NO_3 , что обеспечивает длительность периода действия удобрения);

– используется как основа для добавления других видов подкормок и пестицидов [11–15].

Анализ литературных источников по рассматриваемой теме показывает, что с учетом физико-механических и химических свойств КАС необходимо совершенствовать существующие технологии применения, так как есть нерешенные вопросы по повышению эффективности его использования [16–20].

Особенно интенсивно совершенствуются сельскохозяйственные машины по внесению КАС. Так поставка на российский аграрный рынок голландской машины-ликвилайзера для более эффективного внутривидового внесения удобрений Dupont стимулировала отечественные сельхозмашиностроительные фирмы к созданию отечественных аналогов. В итоге Самарское ООО «Пегас-Агро» разработало систему машин

³ Там же.

⁴ Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса...

⁵ Сычев В. Г., Ефремов Е. Н. Агрохимия в решении задач продовольственной безопасности.

для внесения минеральных удобрений, в частности мультиинжектор «Туман-2М», не уступающий голландской машине⁶ [21–25].

Материалы и методы

В соответствии с поставленными задачами проводились исследования технических средств ООО «Пегас-Агро»: мультиинжектор (ликвилайзер) «Туман-2М» (рис. 1а) и опрыскиватель «Туман-2» (рис. 1б) для внесения азотных жидких минеральных удобрений на основе карбамидно-аммиачной смеси КАС по разным технологиям и нормам внесения с дополнительным добавлением мезо- и микроэлементов.

Полевые исследования проводились в значительно отличающиеся по погодным условиям годы (2021 г. – засушливый, 2022 г. – благоприятный по влаге) на опытных полях Самарского

государственного аграрного университета по общепринятой методике полевого опыта на озимой пшенице сорта Базис селекции Самарского НИИСХ. В исследованиях использовались КАС-32 (N-32 %) и КАС+S, содержащая 26 % азота и 2,5–4,0 % серы. В отдельных опытах, в соответствии с почвенными анализами, использовалась сложная баковая смесь с добавлением в раствор КАС+S недостающих калия (за счет гумата калия, 5 л/га) и микроэлементов: медь, бор, цинк (по 0,5 кг/га) (табл. 1).

Исследования проводились по следующим схемам (рис. 2).

Экспертная оценка широко распространенных в АПК России машинных комплексов «Туман» свидетельствует в первую очередь об эффективно выбранной 3-осевой ходовой платформе с набором шин низкого и сверхнизкого



а)



б)

Р и с. 1. Агрегаты фирмы «Пегас-Агро»: а) мультиинжектор «Туман-2М»; б) опрыскиватель штанговый «Туман-2»

F i g. 1. Units manufactured by the company Pegas-Agro: а) multi-injector Tuman-2M; б) rod sprayer Tuman-2

⁶ Мочкова Т. В., Марченко Л. А., Колесникова В. А. Агроэкономическая оценка применения жидких азотных удобрений в сельском хозяйстве // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: сборник научных докладов Междунар. науч.-технич. конф. 2015. С. 59–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24016086&pff=1> (дата обращения: 03.12.2022); Завалин А. А., Чернова Л. С. Ресурсы биологического азота и его использования в земледелии России // Плодородие почв России: состояние и возможности: сборник статей. 2019. С. 40–49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41492258&pff=1> (дата обращения: 03.12.2022); Жидкие азотные и азотосеросодержащие удобрения на базе КАС – эффективная альтернатива твердым минеральным удобрениям / В. А. Милюткин [и др.] // Проблемы современной аграрной науки: мат-лы Междунар. науч. конф. 2020. С. 71–74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44126248> (дата обращения: 03.12.2022).

Варианты опытов в 2021/2022 гг.
Variants of experiments in 2021/2022

Контроль: разбрасыватель, аммиач. селитра, 120 кг/га / Control: spreader, ammonia, saltpeter, 120 kg/ha		Мультиинжектор «Туман-2М» / Multi-injector Tuman-2M			КАС+S: Опрыск. + Мультиинжектор, 200 + 250 л/га / CAS+S: Offspring. + Mu- ltiinjector, 200 + 250 l/ha	КАС + S + + гум. калия- 5 л/га + Gu + + Br + Zn- 0,5кг/га / CAS + S + + gum. potassium- 5 l/ha + Gu + + Br + Zn- 0.5 kg/ha
Опрыскив., «Туман-2» КАС+S, 200 л/га / Sprayer, Tuman-2 CAS+S, 200 l/ha		КАС+S, 200 л/га / CAS+S, 200 l/ha	КАС+S, 300 л/га / CAS+S, 300 l/ha	КАС+S, 350 л/га / CAS+S, 350 l/ha		

давления. При этом для снижения давления на почву и лучшей сохранности посевов, особенно озимых, используются широкие шины (рис. 1), а для сохранности пропашных культур с междурядьями 70 см при их подкормке устанавливаются узкие шины из комплекта мультиинжектора (рис. 3).

Особенностью агрегатов «Туман» ООО «Пегас-Агро» является то, что все они собраны на единой транспортно-силовой базе «платформе», что обеспечивает при необходимости их взаимозаменяемость (в течение 5 часов) в зависимости от проводимых агрохимических работ.

Результаты исследования

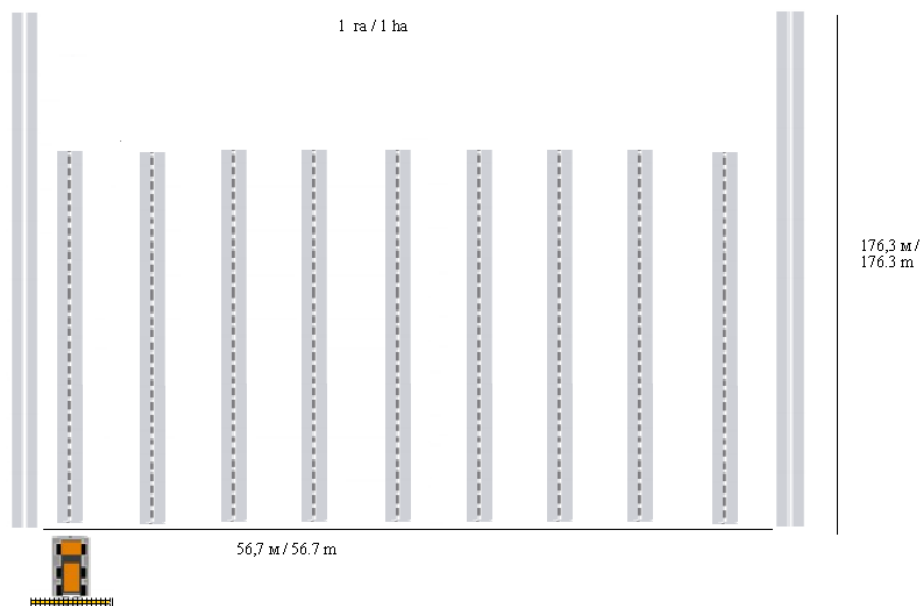
Технологический процесс внесения жидких удобрений в почву мультиинжектором «Туман-2М» представляет собой подачу раствора под давлением 3 атм к иглам инъекционных колес. Иглы с отверстиями на конце, погружаясь в почву, открывают клапан подачи КАС и впрыскивают его на глубину 6–8 см в зону корнеобразования растений с междурядьями 25–35 см.

В качестве альтернативы мультиинжектору «Туман 2М» использовали опрыскиватель «Туман-2» с пятиструйными крупнокапельными форсунками. В процессе исследований, в соответствии с программой, определяли возможности

по прибавке урожайности озимой пшеницы сорта Базис при разных нормах внесения и состава удобрения на базе КАС. Сравнительная эффективность раздельного и одновременного, на одном участке, внесения жидких удобрений КАС мультиинжектором и штанговым опрыскивателем представлена в таблице 2 и в графическом виде на рисунках 4, 5.

В 2021 г. на этапе экспериментальных исследований определяли содержание азота в почве и непосредственно в растениях, а также качество и количество урожая озимой пшеницы сорта Базис. Из результатов исследований следует, что обработка посевов мультиинжектором «Туман-2М», в сравнении с листовой обработкой опрыскивателем «Туман-2», в фазу кущения приводит к увеличению урожайности озимой пшеницы с 48,4 до 56,1 ц/га, что эффективнее на 20 %, и на 40 % (с 39,9 до 56,1 ц/га) – по сравнению с контролем (табл. 2). Комплексная обработка (опрыскивание + мультиинжектор) при норме 200 + 250 л/га позволяет увеличить урожайность до 63,8 ц/га, что на 60 % больше, по сравнению с контролем.

Качественные показатели полученного зерна определяли по белку и клейковине. В итоге применение КАС+S



a)



b)

Р и с. 2. Опытный участок для исследований эффективности внутрипочвенного внесения жидких азотных серосодержащих удобрений КАС+S: а) мультиинжектором «Туман-2М»; б) штанговым опрыскивателем «Туман-2»

Fig. 2. Experimental site for studies of the effectiveness of intra-soil application of liquid nitrogen sulfur-containing fertilizers CAS+S: a) multi-injector Tuman-2M; b) rod sprayer Tuman-2



Р и с. 3. Мультиинжектор «Туман 2М» с узкими колесами на подкормке кукурузы
F i g. 3. Multi-injector Tuman-2M with narrow wheels for feeding corn

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Урожайность озимой пшеницы сорта Базис 2021/2022 гг.
The yield of the winter wheat variety Basis in 2021/2022

Варианты опытов / Variants of experiments						
Контроль: разбрасыватель, аммиач. селитра, 120 кг/га / Control: spreader, ammonia. saltpeter, 120 kg/ha	Опрыскив., «Туман-2» КАС+S, 200 л/га / Sprayer, Tuman-2 CAS+S, 200 l/ha	Мультиинжектор «Туман-2М» / Multi-injector Tuman-2M			КАС+S: Опрыск. + Мультиинжектор, 200 + 250 л/га / CAS+S: Offspring. + Multiinjector, 200 + 250 l/ha	КАС + S + + гум. калия-5 л/га + + Gu + + Br + Zn- 0,5 кг/га / CAS + S + gum. potassium-5 l/ha + + Gu + Br + + Zn-0.5 kg/ha
		КАС+S, 200 л/га / CAS+S, 200 l/ha	КАС+S, 300 л/га / CAS+S, 300 l/ha	КАС+S, 350 л/га / CAS+S, 350 l/ha		
39,9 / 51,7	48,4 / 61,7	56,1 / 62,5	58,2 / 64,1	61,5 / 65,5	63,8 / 78,5	62,8 / 76,9

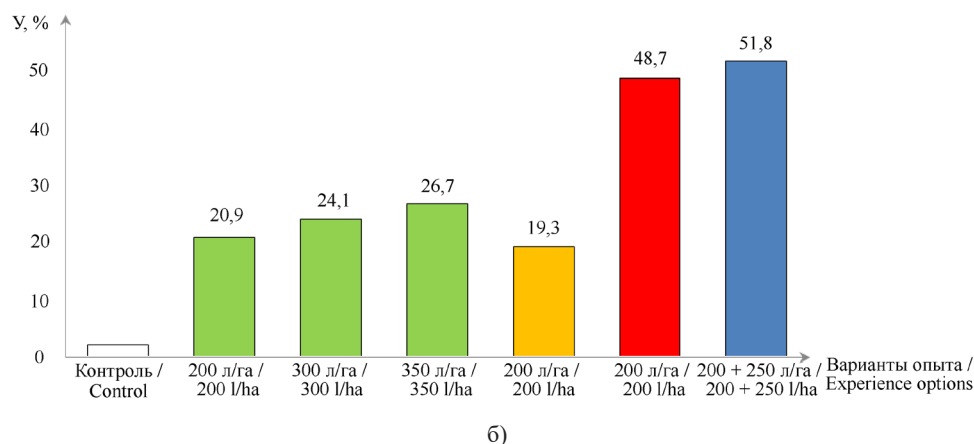
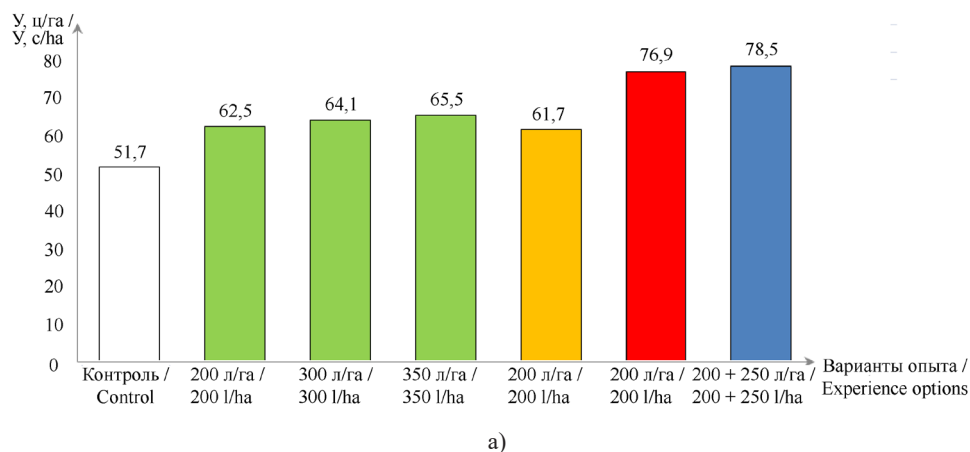
приводит к повышению классности пшеницы по белку с III до I кл., а по клейковине с III до II кл., по сравнению с пшеницей, не обработанной жидкими удобрениями.

В более благоприятный по увлажнению 2022 год урожайность озимой пшеницы от действия удобрений возросла, по сравнению с засушливым 2021 годом (табл. 2, рис. 4).

Agricultural engineering

Так, при внесении жидких удобрений КАС+S при подкормке озимых в фазу кущения мультиинжектором урожайность, по сравнению с контролем, возросла с 51,7 до 65,5 ц/га или на 26,7 % (рис. 4). При добавлении в КАС+S гумата калия в количестве 5 л/га и микроэлементов Gu, Zn, Br по 0,5 кг/га урожайность пшеницы возросла до 76,9 ц/га, или на 48,7 %.

59



- – Контроль / Control
- (green) – Мультиинжектор КАС+S / Multiinjector CAS+S
- (yellow) – Опрыскиватель, 200 л/га / Sprayer, 200 l/ha
- (red) – Мультиинжектор КАС+S+гуматы (5 л/га)+Cu, Zn, Br (0,5 кг/га) / Multiinjector CAS+S+gumates (5 l/ha)+Cu, Zn, Br (0.5 kg/ha)
- (blue) – Мультиинжектор – 350 л/га + Опрыскиватель – 200 л/га / Multiinjector 350 l/ha + Sprayer – 200 l/ha

Р и с. 4. Урожайность озимой пшеницы (2022 г.) в зависимости от технологий обработки посевов: а) урожайность в ц/га; б) урожайность в %

Fig. 4. Yield of winter wheat (2022) depending on crop processing technologies: а) yield in c/ha; б) yield in %

Максимально возможный эффект от применения жидких удобрений получили при комбинированном внесении КАС+S практически двойной нормы (мультиинжектором внутрипочвенно + опрыскивателем поверхностью). Урожайность при этом составила 78,5 ц/га, или на 51,8 % выше относительно контроля.

По итогам 2022 года при наиболее благоприятных условиях для растениеводства по увлажнению на

производственных посевах в Самарской области так же была получена рекордная за последние годы урожайность.

Состояние посевов было хорошим (рис. 5), качество зерна по хлебопекарным показателям, главным образом по клейковине и белку, так же было высоким для озимой пшеницы и находилось на уровне III–II классов (табл. 3), что свидетельствует об эффективном

действию азотных жидких минеральных удобрений.

Эффективность инновационных технологий с внесением жидких азотных минеральных удобрений КАС

будет большей при применении точного земледелия и дополнительных агротехнических мероприятий по влагонакоплению и экономичному ее использованию⁷ [24–26].



a)



b)

Р и с. 5. Озимая пшеница сорт Базис:

a) обработанная мультиинжектором «Туман-2М»; b) обработанная опрыскивателем «Туман-2»

F i g. 5. Winter wheat variety Basis:

a) Treated with a multi-injector Tuman-2M; b) Treated with a sprayer Tuman-2

⁷ Милюткин В. А. Инновационные техника и технологии применения жидких удобрений КАС в регионах с недостаточным увлажнением при прогнозируемом глобальном потеплении : моногр. Кинель, 2021. 181 с. ; Прокопчук Р. Е., Беляев В. И. Эффективность машинно-тракторных агрегатов для внутрипочвенного внесения жидких минеральных удобрений // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сборник материалов XVII Междунар. науч.-практич. конф. в 2-х книгах. 2022. С. 66–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48559596> (дата обращения: 03.12.2022) ; Прокопчук Р. Е., Беляев В. И., Щербинин В. В. Точная инъекция жидких минеральных удобрений // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сборник материалов XVI Междунар. науч.-практич. конф. в 2 кн. 2021. С. 32–34. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46137892> (дата обращения: 03.12.2022) ; Длужевский Н. Г., Милюткин В. А. Оптимизация транспортной логистики жидких удобрений ПАО «КуйбышевАзот» по программе завод-поле // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : Сборник V Всерос. (нац.) науч. конф. 2020. С. 1138–1142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44343408> (дата обращения: 03.12.2022) ; Милюткин В. А., Длужевский Н. Г. Логистика жидких удобрений ПАО «КуйбышевАзот» – от завода до сельхозпредприятия – АПК // Теоретические и концептуальные проблемы логистики и управление цепями поставок : сборник статей II Междунар. науч.-практич. конф. 2020. С. 49–53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43809794> (дата обращения: 03.12.2022) ; Исследование эффективности инновационной технологии внесения жидких удобрений КАС внутрипочвенно и поверхностно агрегатами «Пегас-Агро» / В. А. Милюткин [и др.] // Актуальные вопросы агропромышленного комплекса России и за рубежом : мат-лы Всерос. (нац.) науч.-практич. конф. с международным участием. 2021. С. 114–121. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47442195> (дата обращения: 03.12.2022).

Таблица 3
 Table 3

Показатели качества озимой пшеницы, %, I–IV класс – сорт Базис Самарского НИИСХ в опытах при различном питании и технологиях внесения агрегатами «Туман-2» – опрыскиватель (O), «Туман-2М» – мультинжектор (M) в опытах Самарского ГАУ в 2022 году

Quality indicators of winter wheat, %, I–IV class – the Basis variety of the Samara Research Institute in experiments with different nutrition and application technologies with the units Tuman-2 – sprayer (S), Tuman-2M – multi-injector (M) in the experiments of the Samara GAU in 2022

Варианты опытов / Variants of experiments	Протеин, белок, % (класс) / Protein, % (class)	Влажность, % / Humidity, %	Массовая доля сырой клейковины, % (класс) / Mass fraction of raw gluten, % (class)	Качество сырой клейковины, ед. прибора ИДК, % (класс) / Raw gluten quality, units device, % (class)	Стекловидность, % (класс) / Virtuosity, % (class)
1. Контроль, аммиачная селитра / Control, ammonium nitrate	11,579 (IV)	12,615	19,867 (IV)	67,470 (I)	44,919 (II)
2. (O) КАС-32-200 л/га / (S) КАС-32-200 л/га	11,659 (IV)	12,796	20,422 (III)	68,023 (I)	45,479 (II)
3. (M) КАС-32-200 л/га / (M) КАС-32-200 л/га	12,797 (III)	12,442	22,551 (II)	69,072 (I)	47,085 (II)
4. (M) КАС-32-300 л/га / (M) КАС-32-300 л/га	14,318 (I)	12,396	25,163 (II)	63,225 (I)	43,459 (II)
5. (M) КАС-32-350 л/га / (M) КАС-32-350 л/га	14,269 (I)	12,816	25,407 (II)	67,243 (I)	46,566 (II)
6. КАС-32 (O) – 200 л/га (M) – 250 л/га / КАС-32 (S) – 200 л/га (M) – 250 л/га	13,828 (I)	12,600	24,798 (II)	65,444 (I)	44,836 (II)
7. КАС+S-200 л/га + гумат калия-5 л/га + Cu + Zn + Br-0,5 кг/га + ингибитор 0,1 кг/га / КАС+S-200 л/га + gum. Potassium 5 l/ha + Cu + Br + Zn-0.5 kg/ha + inhibitor 0,1 kg/ha	19,780 (I)	12,620	24,452 (II)	67,039 (I)	44,060 (II)

Обсуждение и заключение

1. На повышение урожайности и качества возделываемых сельскохозяйственных культур по результатам наших многолетних исследований значительным образом влияют азотные жидкие удобрения на основе карбамидно-аммиачной смеси КАС, производимые ПАО «Куйбышев Азот» (г. Тольятти, Самарская обл.), особенно с добавлением мезоэлемента серы (S) КАС+S, гумата калия и недостающих в почве микроэлементов: Cu, Zn, Br.

2. При применении КАС наиболее эффективной технологией его внесения, особенно в засушливые годы, является внутрпочвенное инъекторное внесение ликвилайзерами. В наших опытах хорошие результаты показал мультиинжектор

«Туман-2М» российского производства ООО «Пегас-Агро» (г. Самара).

3. Проведенные Самарским ГАУ полевые сравнительные испытания показывают, что применение инновационных технологий внесения КАС+S способствует увеличению урожайности озимой пшеницы сорта Базис до 51,8 %, а также приводит к повышению ее классности по белку с III до I кл., а по клейковине – с III до II кл., по сравнению с пшеницей, не обработанной жидкими удобрениями.

4. В целом жидкие минеральные удобрения КАС имеют преимущество, по сравнению с твердыми, особенно в засушливые годы, что особенно актуально в условиях прогнозируемого глобального потепления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюшин В. И. Задачи научно-инновационного обеспечения земледелия России // Земледелие. 2018. № 3. С. 3–8. doi: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10301>
2. Кирюшин В. И. Научные предпосылки технологической модернизации земледелия в России // Известия Международной академии аграрного образования. 2017. № 36. С. 18–22. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30707930> (дата обращения: 03.12.2022).
3. Кирюшин В. И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139. doi: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070062>
4. Кирюшин В. И. Научные предпосылки оптимизации использования земельных ресурсов // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 4. С. 7–10. doi: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/7-10>
5. Сычев В. Г., Милащенко Н. З., Шафран С. А. Агрохимические аспекты получения высококачественного зерна в России // Плодородие. 2018. № 1. С. 18–19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32466615> (дата обращения: 03.12.2022).
6. Сычев В. Г., Шафран С. А., Виноградова С. Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13. doi: <https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
7. Факторы урожайности озимой пшеницы в условиях Нечерноземья / Б. И. Сандухадзе [и др.] // Плодородие. 2021. № 3. С. 66–70. doi: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.12>
8. Реализация потенциала продуктивности и качества сортов озимой пшеницы на разных уровнях азотного питания / Б. И. Сандухадзе [и др.] // Агрохимический вестник. 2020. № 5. С. 23–27. URL: <https://clck.ru/33WibP> (дата обращения: 03.12.2022).
9. Влияние различных доз азотных удобрений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы / В. И. Мазалов [и др.] // Земледелие. 2019. № 4. С. 19–21. doi: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10404>
10. Агротехнические и агрохимические аспекты оптимизации азотного питания озимой трикале на дерново-подзолистой почве центрального Нечерноземья РФ / В. В. Конончук [и др.] //

Аграрная Россия. 2022. № 4. С. 7–14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48294712> (дата обращения: 03.12.2022).

11. Эффективность систем удобрения и источников азота при возделывании озимых и яровых зерновых культур в севообороте на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве Центрального Нечерноземья / В. В. Конончук [и др.] // *Агрохимический вестник*. 2022. № 2. С. 15–21.

12. Оптимизация азотного питания озимой пшеницы в центре Нечерноземной зоны Российской Федерации с использованием почвенной и растительной диагностики / В. В. Конончук [и др.] // *Агрохимический вестник*. 2022. № 3. С. 3–9.

13. Реакция почвы и растений на внесение азотного удобрения под озимые и яровые зерновые культуры в Центральном Нечерноземье / В. В. Конончук [и др.] // *Агрохимический вестник*. 2021. № 5. С. 54–59.

14. Небытов В. Г., Коломейченко В. В., Мазалов В. И. Высокопродуктивные сорта и удобрения – основа устойчивого наращивания производства зерна озимой пшеницы в условиях Орловской области // *Вестник аграрной науки*. 2019. № 1. С. 11–18. doi: <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.1.11>

15. Влияние минерального питания на интенсивность продукционного процесса у яровой пшеницы / Л. В. Осипова [и др.] // *Плодородие*. 2021. № 6. С. 50–52. doi: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.13>

16. Мамеев В. В., Ториков В. Е., Петрова С. Н. Продуктивность озимой пшеницы при ранневесенней подкормке различными марками азотных и комплексных удобрений в условиях Брянской области // *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 4. С. 3–10. doi: <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2022-92-4-3-10>

17. Современное состояние, тенденции и проблемы производства зерна в Российской Федерации / В. Е. Ториков [и др.] // *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2022. № 1. С. 15–23. URL: http://avv-ivgsha.ucoz.ru/agro_vet_1_22_ispravlen.pdf (дата обращения: 03.12.2022).

18. Влияние азотных удобрений и биопрепаратов на урожайность зерна в смешанных бобово-мятликовых агроценозах / А. С. Кононов [и др.] // *Агрохимический вестник*. 2021. № 2. С. 3–9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45691144> (дата обращения: 03.12.2022).

19. Эффективность подкормок озимой пшеницы различными марками азотных и комплексных удобрений / В. В. Мамеев [и др.] // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 6. С. 12–19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46669270> (дата обращения: 03.12.2022).

20. Завалин А. А., Соколов О. А. Коэффициент использования растениями азота удобрений и его регулирование // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2019. № 4. С. 71–75. doi: <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-14070>

21. Гаврилов В. А., Федорова Ю. Н., Федотова Е. Н. Оценка влияния жидких комплексных удобрений на урожайность зерна озимой пшеницы // *Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 2. С. 13–16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43852992> (дата обращения: 03.12.2022).

22. Преимущество жидких минеральных удобрений на базе КАС-32 по сравнению с твердыми – аммиачная селитра – на подсолнечнике и кукурузе / В. А. Милюткин [и др.] // *Нива Поволжья*. 2020. № 3. С. 73–79. doi: <https://doi.org/10.36461/NP.2020.56.3.018>

23. Милюткин В. А., Буксман В. Э. Инновационные технические решения для внесения жидких и твердых минеральных удобрений одновременно с посевом // *Техника и оборудование для села*. 2018. № 10. С. 16–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36457812> (дата обращения: 03.12.2022).

24. Тютюнов С. И. Комплексная оценка влияния многолетнего применения удобрений на основные показатели плодородия чернозема типичного // *Плодородие*. 2021. № 3. С. 45–48. doi: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.07>

25. Wilson W., Shakya S., Dahl B. Dynamic Changes in Spatial Competition for the Nitrogen Fertilizer Industry in the United States // *Agricultural Systems*. 2015. Vol. 135. P. 10–19. doi: <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2014.11.006>



26. Modern Technology for Cultivation of Agricultural Crops in Zones of “Risk Farming” with Conservation and Accumulation of Atmospheric Moisture / V. A. Milyutkin [et al.] // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Сеп. “Lecture Notes in Networks and Systems”. 2022. P. 138–146. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_15

Поступила 05.12.2022; одобрена после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 10.02.2023

Об авторах:

Милюткин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии производства и экспертизы продукции из растительного сырья Самарского ГАУ (446442, Российская Федерация, г. Кинель, ул. Учебная, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-4862>, Researcher ID: [AAZ-5043-2019](https://orcid.org/0000-0001-8948-4862), oiapp@mail.ru

Овчинников Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0350-8478>, Researcher ID: [O-6834-2018](https://orcid.org/0000-0003-0350-8478), ovchinnikovv81@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В. А. Милюткин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, проведение лабораторных исследований, формирование выводов, доработка текста.

В. А. Овчинников – литературный анализ, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста и редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kiryushin V.I. [Tasks of Scientific and Innovative Support of Agriculture in Russia]. *Zemledelie*. 2018;(3):3–8. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2018-10301>
2. Kiryushin V.I. Scientific Prerequisites for Technological Modernization of Agriculture in Russia. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2017;(36):18–22. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30707930> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kiryushin V.I. The Management of Soil Fertility and Productivity of Agroecosystems in Adaptive-Landscape Farming Systems. *Eurasian Soil Science*. 2019;(9):1130–1139. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070062>
4. Kiryushin V.I. Scientific Prerequisites of Optimization of Land Resources. *Vestnik of the Russian Agricultural Sciences*. 2019;(4):7–10. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/7-10>
5. Sychev V.G., Milaschenko N.Z., Shafran S.A. Agrochemical Aspects of Production of High-Quality Grain in Russia. *Plodorodie*. 2018;(1):18–19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32466615> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Sychev V.G., Shafran S.A., Vinogradova S.B. Soil Fertility in Russia and Ways of Its Regulation. *Agrokhimia*. 2020;(6):3–13. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
7. Sandukhadze B.I., Mamedov R.Z., Afanasev R.A., et al. [Winter Wheat Yield Factors in the Non-Black Soil Region]. *Plodorodie*. 2021;(3):66–70. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.12>
8. Sandukhadze B.I., Kuzmich M.A., Bugrova V.V., et al. Realization of Productivity Potential and Quality of Winter Wheat Varieties at Different Levels of Nitrogen Nutrition. *Agrochemical Herald*. 2020;(5):23–27. Available at: <https://clck.ru/33WibP> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

9. Mazalov V.I., Mosina O.M., Hmyzova N.G., Donskoj M.M. Influence of Various Doses of Nitrogen Fertilizers on Yield and Quality of Winter Wheat Grain. *Zemledelie*. 2019;(4):19–21. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10404>
10. Kononchuk V.V., Timoshenko S.M., Medvedev A.M., et al. Agrotechnical and Agrochemical Aspects of Optimizing Nitrogen Nutrition of Winter Triticale on Sod-Podzolic Soil of the Central Non-Chernozem Region of the Russian Federation. *Agrarnaya Rossiya*. 2022;(4): 7–14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48294712> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Kononchuk V.V., Timoshenko S.M., Shtyrkhunov V.D., Nazarova T.O. [Efficiency of Fertilizer Systems and Nitrogen Sources for Winter and Spring Grain Crops in the Rotation on Sod-Podzol Medium-Loam Soil of the Central Black Earth Region]. *Agrokhimicheskij vestnik*. 2022;(2):15–21. (In Russ.)
12. Kononchuk V.V., Timoshenko S.M., Shtyrkhunov V.D., Nazarova T.O. [Optimization of Nitrogen Nutrition of Winter Wheat in the Center of the Non-chernozem Zone of the Russian Federation Using Soil and Plant Diagnostics]. *Agrokhimicheskij vestnik*. 2022;(3):3–9. (In Russ.)
13. Kononchuk V.V., Timoshenko S.M., Shtyrkhunov V.D., Nazarova T.O. [Soil and Plant Response to Nitrogen Fertilizer Application for Winter and Spring Cereals in Central Non-Chernozem Region]. *Agrokhimicheskij vestnik*. 2021;(5):54–59. (In Russ.)
14. Nebytov V.G., Kolomeychenko V.V., Mazalov V.I. [High-Yield Varieties and Fertilizers Are the Basis for Sustainable Increase in Winter Wheat Grain Production in the Orel Region]. *Vestnik agrarnoy nauki*. 2019;(1):11–18. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.1.11>
15. Osipova L.V., Vernichenko I.V., Puhalskaya N.V., et al. The Influence of Mineral Nutrition on the Intensity of the Production Process in Spring Wheat. *Plodородie*. 2021;(6):50–52. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.13>
16. Mameev V.V., Torikov V.E., Petrova S.N. Productivity of Winter Wheat During Early Spring Fertilizing with Various Nitrogen and Complex Fertilizers in the Bryansk Region. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2022;(4):3–10. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2022-92-4-3-10>
17. Torikov V.E., Vaskin V.F., Dronov A.V., Vaskina T.I. Current State, Trends and Problems of Grain Production. *Agrarian Journal of Upper Volga Region*. 2022;(1):15–23. Available at: http://avv-ivgsha.ucoz.ru/agro_vet_1_22_ispravlen.pdf (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Kononov A.S., Belous N.M., Torikov V.E., et al. Influence of Nitrogen Fertilizers and Biopreparations on Grain Yield in Mixed Legume-Bluegrass Agrocoenosis. *Agrochemical Herald*. 2021;(2):3–9. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45691144> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Mameev V.V., Torikov V.E., Petrova S.N., et al. Efficiency of Feeding Winter Wheat by Different Brands Nitrogen and Complex Fertilizers. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2021;(6):12–19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46669270> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Zavalin A.A., Sokolov O.A. Utilization by Plants of Nitrogen Fertilizer and Its Regulation. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal*. 2019;(4):71–75. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-14070>
21. Gavrilov V.A., Fedorova Yu.N., Fedotova Ye.N. [Evaluation of the Effect of Liquid Complex Fertilizers on Winter Wheat Grain Yield]. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2020;(2):13–16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43852992> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Milyutkin V.A., Sysyoev V.N., Makushin A.N., et al. Advantages of Liquid Mineral Fertilizers on the Base of KAS-32 in Comparison with Solid Fertilizers (Ammonium Nitrate) on Sunflower and Corn. *Niva Povolzhya*. 2020;(3):73–79. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.36461/NP.2020.56.3.018>
23. Milyutkin V.A., Buksman V.E. Innovative Engineering Solutions for Applying Liquid and Solid Mineral Fertilizers Simultaneously with Sowing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2018;(10):16–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36457812> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

24. Tyutyunov S.I. Comprehensive Assessment of the Long-Term Use of Fertilizers on the Main Indicators of the Fertility of Typical Chernozem. *Plodorodie*. 2021;(3):45–48. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.07>

25. Wilson W., Shakya S., Dahl B. Dynamic Changes in Spatial Competition for the Nitrogen Fertilizer Industry in the United States. *Agricultural Systems*. 2015;135:10–19. doi: <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2014.11.006>

26. Milyutkin V.A., Buxmann V., Mozgovoy A., et al. Modern Technology for Cultivation of Agricultural Crops in Zones of “Risk Farming” with Conservation and Accumulation of Atmospheric Moisture. In: XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Cep. “Lecture Notes in Networks and Systems”. 2022. p. 138–146. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_15

Submitted 05.12.2022; revised 20.01.2023; accepted 10.02.2023

About the authors:

Vladimir A. Milyutkin, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Production Technology and Expertise of Products from Vegetable Raw Materials, Samara State Agrarian University (2 Uchebnaya St., Kinel 446442, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-4862>, Researcher ID: [AAZ-5043-2019](https://orcid.org/0000-0001-8948-4862), oiapp@mail.ru

Vladimir A. Ovchinnikov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0350-8478>, Researcher ID: [O-6834-2018](https://orcid.org/0000-0003-0350-8478), ovchinnikovv81@yandex.ru

Authors contribution:

V. A. Milyutkin – scientific guidance, formulation of the basic research concept, conducting laboratory research, drawing conclusions, finalizing the text.

V. A. Ovchinnikov – literary analysis, processing the results of the experiment, preparing the initial version of the text, and editing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 621.658:621.45.017

doi: 10.15507/2658-4123.033.202301.068-078

Оригинальная статья



Использование тарельчатых диафрагм транспортных средств в двухконтурных мембранных насосах

А. П. Левцев¹✉, Е. С. Лапин¹, Д. Чжень²¹ *Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
(г. Саранск, Российская Федерация)*² *Цзянсуский университет науки и технологии
(г. Чжэньцзян, Китай)*✉ levtzevap@mail.ru

Аннотация

Введение. Статья посвящена повышению эффективности работы двухконтурных мембранных насосов, которые могут успешно использоваться в системах тепло- и водоснабжения промышленных и сельскохозяйственных объектов с избыточным напором. Двухконтурные мембранные насосы целесообразно оснащать тарельчатыми диафрагмами, связанными между собой штоком, например, от автотранспортных средств, а привод мембранных насосов осуществлять от напора гидравлической сети. Для повышения эффективности работы необходимо прогнозировать гидравлические характеристики по геометрическим параметрам мембран и циклу их работы в динамике.

Цель статьи. Получить адекватные расчетные зависимости расхода перекачиваемой жидкости от частоты двухконтурных мембранных насосов.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач по установлению зависимости между перемещением штока и расходом для тарельчатой диафрагмы с разными геометрическими поверхностями в динамике использовались методы идеализации из дифференциальной геометрии, физического эксперимента, математической статистики. Получены зависимости объема тарельчатой диафрагмы от перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой и объемного расхода, от скорости перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой с конкретными геометрическими параметрами для параболической и цепной линии. Проведена экспериментальная проверка вытесняемого расхода перекачиваемой жидкости от перемещения точки крепления к штоку для диафрагмы типа 30.

© Левцев А. П., Лапин Е. С., Чжень 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. На основании полученных зависимостей объемного расхода от скорости перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой с конкретными геометрическими параметрами для параболической и цепной линии построены графики объемного расхода от частоты рабочего цикла. Для практической реализации предложены зависимости для построения гидравлической характеристики двухконтурного мембранного насоса (зависимость объемного расхода от частоты рабочего цикла), полученные на основе параболической интерпретации.

Обсуждение и заключение. Гидравлические характеристики двухконтурного мембранного насоса приближаются к уравнению прямой линии и согласуются с экспериментальными зависимостями в пределах 4 %.

Ключевые слова: мембранный насос, тарельчатая диафрагма, гидравлическая характеристика, динамика, системы тепло- и водоснабжения, энергетическая эффективность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Левцев А. П., Лапин Е. С., Чжень Д. Использование тарельчатых диафрагм транспортных средств в двухконтурных мембранных насосах // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 68–78. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.068-078>

Original article

The Use of Disk-Shaped Diaphragm of Vehicles in Double-Circuit Diaphragm Pumps

A. P. Levtshev^{a✉}, E. S. Lapin^a, D. Chen^b

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

^b Jiangsu University of Science and Technology
(Zhenjiang, China)

✉ levtzevap@mail.ru

Abstract

Introduction. The article concentrates on improving the efficiency of double-circuit diaphragm pumps, which can be successfully used in heat and water supply systems of industrial and agricultural facilities where there is excess head. It is advisable to equip double-circuit diaphragm pumps with disc-shaped diaphragms interconnected by a rod, for example, from motor vehicles, and to drive them from the available head of the hydraulic network. In order to increase the efficiency of their work and further use, it is necessary to predict the hydraulic characteristics according to the geometric parameters of the membranes and the cycle of their operation in dynamics.

Aim of the Article. The article aims at obtaining adequate calculated dependencies of pumped liquid flow rate on speed of double-circuit diaphragm pumps.

Materials and Methods. There were used the idealization method from differential geometry, physical experiment, and mathematical statistics to solve the tasks for identifying the relationship between the rod motion and the liquid flow rate for a poppet diaphragm with different geometric surfaces in dynamics. There have been obtained the dependences of pumped liquid volume on the movement of the point of attachment by the poppet diaphragm and the volume flow rate on the movement speed of the point of attachment by the poppet diaphragm with specific geometric parameters for the parabolic and chain line. An experimental testing of the dependence of displaced pumped liquid flow rate on the movement of the attachment point to the stem for the diaphragm type 30 was carried out.

Results. Based on the obtained dependences of the volume flow rate on the speed of movement of the point of attachment by a poppet diaphragm with specific geometric parameters

for a parabolic and chain line, there were constructed the graphs of dependences of the volume flow rate on the frequency of the working cycle. For practical implementation, there are proposed the dependencies for constructing the hydraulic characteristics of a two-circuit membrane (the dependence of the volume flow rate on the frequency of the working cycle) obtained on the basis of a parabolic interpretation.

Discussion and Conclusion. The hydraulic characteristics of a two-circuit membrane pump are close to the equation of a straight line and are consistent with experimental dependencies within 4%.

Keywords: diaphragm pump, disc diaphragm, hydraulic characteristics, dynamics, heat and water supply systems, energy efficiency

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

For citation: Levtshev A.P., Lapin E.S., Chen D. The Use of Disk-Shaped Diaphragm of Vehicles in Double-Circuit Diaphragm Pumps. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):68–78. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.068-078>

Введение

В настоящее время в большинстве отраслей экономики, связанных с использованием топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), применяется большое число насосов различных типов и назначения (повысительных, циркуляционных, питательных и др.). Причем значительная доля принадлежит центробежным насосам благодаря их неоспоримым преимуществам, таким как компактность, сравнительно высокие энергетические характеристики, срок службы, простота регулирования и др. Использование таких насосов в частотных электроприводах позволило существенно снизить их энергопотребление. Однако применение центробежных насосов с частотными приводами не всегда оправдано с экономической точки зрения, например, в тепловых узлах зданий и производственных помещений, где в большинстве случаев имеется избыточный напор тепловой сети, который срезается с помощью дроссельных шайб. В системах водоснабжения мясосоперерабатывающих комплексов, где используется большое количество воды,

часто возникает ситуация, когда в одних контурах напора недостаточно, а в соседних он избыточный. Для использования избыточного напора для газовых сред широко применяются малорасходные (не более $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$) детандеры с объемным принципом действия. Их технический уровень практически определяет эффективность и надежность работы установок и систем в целом¹ [1–3]. Однако в перечисленных выше системах они не используются из-за особенностей сред и процессов, протекающих в таких системах. В связи с этим есть необходимость создания мембранных двухконтурных насосов с тарельчатыми диафрагмами, которые широко используются в торозных системах транспортных средств. При этом условия работы тарельчатых диафрагм существенно меняются, и для построения расходных зависимостей таких насосов требуется установление зависимостей расхода от скорости перемещения диафрагм.

Обзор литературы

Малорасходные нагнетатели (насосы, детандеры) широко востребованы на российском рынке, постоянно

¹ Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. М. : Машиностроение, 1977. С. 230 ; Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К. Поршневые компрессоры. Л. : Машиностроение, 1987. 372 с. ; Чеботарев А. А. Специализированные автотранспортные средства: выбор и эффективность применения. М. : Транспорт, 1988. 159 с. ; Бусаров С. С. Повышение эффективности компрессорного оборудования дорожно-строительных машин: дис... канд. техн. наук. Омск, 2008. 212 с.

совершенствуются и модернизируются. По конструктивным признакам различают поршневые и мембранные типы малорасходных детандеров с объемным принципом действия с кривошипно-шатунным, аксиальным, кулачковым или кулисным механизмом движения, преобразующим вращательное движение элементов привода в возвратно-поступательное движение подвижного органа (поршня, мембраны) рабочей камеры. За последнее время в связи с расширением области применения таких детандеров перечень требований к ним существенно расширился. В частности, на сегодняшний день актуален вопрос о необходимости снижения удельных массо-габаритных показателей и повышении КПД² [4–8]. В традиционных мембранных насосах перекачивание жидкости достигается за счет перемещения эластичной мембраны под действием сжатого воздуха. Использование сжатого воздуха для привода мембранных насосов в ряде случаев, например, в системах водоснабжения, где возможно создать избыточный напор, нецелесообразно. В связи с этим были предприняты попытки разработки мембранных насосов путем создания управляемого гидроудара при прерывании потока жидкой среды. Действительно, при резком прерывании потока жидкой среды с помощью ударного клапана перед ним давление может увеличиваться в несколько раз и мембранный насос работает как

демпфирующее устройство и совершает полезную работу по перекачиванию жидкости. Анализ таких насосов показал, что их производительность зависит от приращения объема рабочей среды при повышении давления и в большинстве случаев недостаточна для заданного хода диафрагмы³. С учетом этих обстоятельств были созданы конструкции двухконтурных мембранных насосов с тарельчатыми диафрагмами, связанными общим штоком. Перемещение штока осуществляется под действием разности давлений в рабочих камерах. Для повышения эффективности работы двухконтурных мембранных насосов с тарельчатыми диафрагмами переключающие клапаны работают в режимах, приближенных к гидравлическому удару, а энергия удара используется для повышения скорости в крайних положениях штока⁴ [9]. При испытаниях таких насосов выявились их недостаточно полное использование полезного объема камер и зависимость расхода вытесняемой жидкости от частоты. Поэтому такие насосы пока подбираются под конкретные характеристики установки экспериментально. Для широкого использования двухконтурных мембранных насосов необходимо создание их теоретических основ, которые обеспечивали бы расчетные гидравлические и энергетические характеристики на стадии проектирования. В связи с этим целью данной работы было получение адекватных расчетных зависимостей

² Oralli E. Conversion of a Scroll Compressor to an Expander for Organic Rankine Cycle: Modeling and Analysis : Thesis Master of Applied Science. Ontario, 2010. 146 p. ; Small Scale Solar ORC System for Distributed Power / M. Orosz [et al.] // Conference Solar Paces 2009: Abstracts of the International Conference. Berlin, 2009. P. 39–47.

³ Левцев А. П., Макеев А. Н. Импульсные системы тепло- и водоснабжения. Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, 2015. 172 с.

⁴ Левцев А. П., Лапин Е. С., Панкратьев Р. В. Испытание двухкамерного мембранного насоса // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : межвузовский сборник научных трудов. Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2017 ; Левцев А. П., Лапин Е. С., Ерофеев В. Т. Повышение теплопередачи секционных радиаторов отопления организацией пульсаций теплоносителя // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : Сборник научных трудов РААСН. М. : Издательство АСВ, 2022. С. 165–176.

расхода от частоты двухконтурных мембранных насосов. Для этого решались следующие задачи: установление зависимости между перемещением штока и расходом для тарельчатой диафрагмы с разными геометрическими поверхностями; построение экспериментальной зависимости вытесняемого объема от перемещения штока; построение расчетной зависимости расхода от частоты диафрагменного насоса (ДН) с диафрагмой типа 30 и проверка ее адекватности.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач по установлению зависимости между перемещением штока и расходом для тарельчатой диафрагмы с разными геометрическими поверхностями использовались методы идеализации из дифференциальной геометрии, физического эксперимента, математической статистики.

Тарельчатые диафрагмы от тормозных систем различных транспортных средств находят применение в мембранных насосах для перекачивания теплоносителя в системах теплоснабжения⁵. Привод этих насосов осуществляется за счет располагаемого напора тепловой сети. Такие насосы выполняются двухконтурными, причем две диафрагмы связаны через жесткий шток (рис. 1), поэтому порция вытесняемого расхода насосной секции зависит от величины перемещения штока.

Для установления зависимости между перемещением штока и расходом для тарельчатой диафрагмы воспользуемся методом идеализации со следующими допущениями:

1. Поверхность предполагается идеальной поверхностью вращения линии параболического типа. В реальности поверхность допускает изометрическую деформацию (изгибание). Не исключена и небольшая растяжимость. При изгибании сохраняются не только длины дуг, но и площадь поверхности.

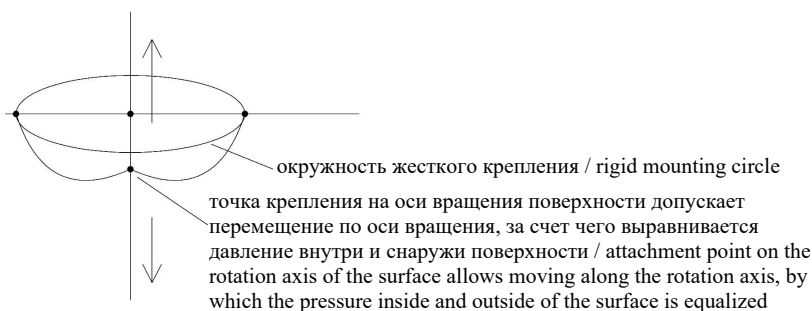


Р и с. 1. Две тарельчатые диафрагмы, связанные через жесткий шток

F i g. 1. Two disc-shaped diaphragms connected through a rigid rod

2. Реальный диск крепления в центре вращения заменяется точкой (рис. 2).

В качестве модельных линии-меридиан рассмотрим параболы и цепные линии.



Р и с. 2. Схематическое изображение поверхности диафрагмы

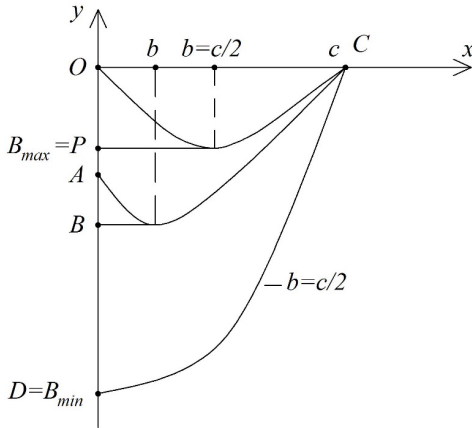
F i g. 2. Schematic representation of the diaphragm surface

⁵ Погорелов А. В. Дифференциальная геометрия. М. : Наука, 1974. 176 с.

Уравнение параболы в общем виде записывается как

$$y = (x - b)^2 - a(c - b)^2. \quad (1)$$

Основные соотношения между параметрами для поверхности диафрагмы параболического типа на оси xoy приведены на (рис. 3).



Р и с. 3. Графическая интерпретация диафрагмы в системе координат xoy

Fig. 3. Graphical interpretation of the aperture in the xoy coordinate system

Как следует из (рис. 3), при любых значениях x параметры a в линии проходят через точку $C(x = c, y = 0)$. Вершина параболы получена при $x = b$ и $y(b) = B = -a(c - b)^2$. При пересечении с осью вращения при $x = 0, y(0) = A = ac(2b - c)$, получаем:

$$B_{\min} = D = B = A|_{b=0} = -ac^2.$$

Учитывая, что линия при $b = 0$ предельная, получим постоянное значение:

$$D = \text{const} \text{ и } a = -\frac{D}{c^2} = \text{const}.$$

Таким образом, параметр a заменяется геометрически и физически

понятным параметром D . То есть перемещение точки A по оси вращения, изменение параболы, ее длины L , площади поверхности S и объем тела вращения V являются функцией параметра b .

$$L = L(b), S = S(b), V = V(b).$$

При этом формулы вычисления их длины поверхности $L(b)$, площади $S(b)$ и объема $V(b)$ известны⁶:

$$L(b) = \int_0^c \sqrt{1 + (y')^2} dx, \quad (2)$$

$$S(b) = 2\pi \int_0^c x \sqrt{1 + (y')^2} dx, \quad (3)$$

$$V(b) = \pi \int_0^c x^2 y' dx. \quad (4)$$

Полагая функцию $b = b(t)$ и $\frac{db}{dt} = \dot{b}$, можем найти линейную скорость перемещения точки A :

$$v = \frac{dA}{dt} = \dot{A}, \quad (5)$$

и скорость изменения объема:

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V}. \quad (6)$$

При этом скорость изменения объема определяет расход жидкости в двухконтурном мембранном насосе.

Проведем вычисления расхода для параболы (1).

Так как как $y' = 2a(x - b)$, то $L(b) = \int_0^c \sqrt{1 + 4a^2(x - b)^2} dx$ – интеграл в конечном виде (в элементарных функциях не берется).

$S(b) = 2\sigma \int_0^c x \sqrt{1 + 4a^2(x - b)^2} dx$ – интеграл в конечном виде не берется.

⁶ Бусаров С. С. Повышение эффективности компрессорного оборудования...

$$V(b) = \pi \int_0^c x^2 y' dx = \frac{\pi ac^3}{6} [3c - 4b].$$

Находим производные \dot{A} и \dot{V} :

$$v = \dot{A} = 2ac\dot{b},$$

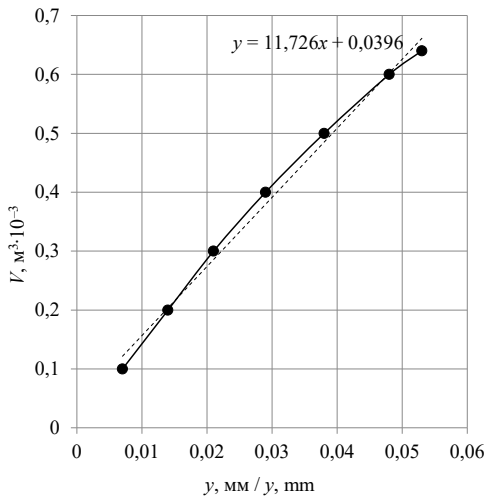
$$\dot{V} = -\frac{2\sigma ac^3}{3} \dot{b}.$$

Таким образом, для семейства парабол расход и линейная скорость v связаны линейной зависимостью:

$$\dot{V} = -\frac{\pi c^2}{3} v. \quad (7)$$

Замечание: знак « \leftarrow » гасится знаком $v = 2acb$, $sign b = sign v$ и при $v > 0, b > 0$, что означает движение точки A вверх (от D к O), b растет от O до $b = \frac{c}{2}$. Но в этом случае объем уменьшается, поэтому $V < 0$.

При движении b от $\frac{c}{2}$ к O , $\dot{b} < 0, v > 0$, и объем V увеличивается, то есть $V < 0$.



Р и с. 4. Экспериментальные зависимости $V=f(y)$
F i g. 4. Experimental dependencies $V=f(y)$

Результаты исследования

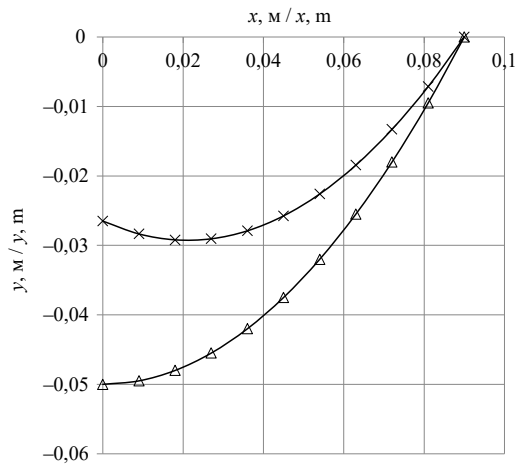
На (рис. 4) для диафрагмы типа 30 приведены экспериментальные зависимости $V=f(y)$. Экспериментальные зависимости получены для насосной секции диафрагмы, заполненной водой за счет создания избыточного давления в рабочей секции ручным опрессовочным насосом «Мегеон 98025». Положение штока контролировалось металлической линейкой⁷.

На рисунке 5 для конкретных параметров диафрагмы типа 30 (ход штока 53 мм, диаметр диафрагмы 180 мм) представлен график параболической интерпретации.

На рисунке 6 для конкретных параметров диафрагмы типа 30 (ход штока 53 мм, диаметр диафрагмы 180 мм) представлен график цепной интерпретации.

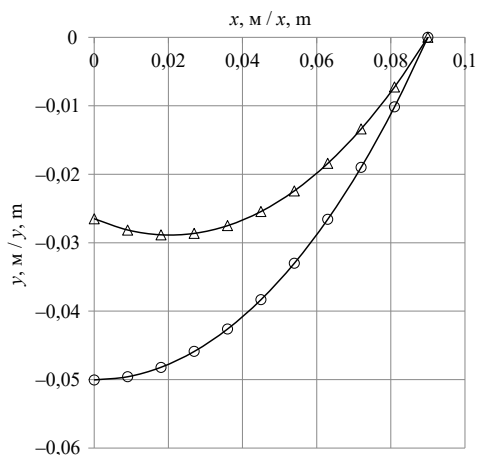
На рисунке 7 для конкретных параметров диафрагмы типа 30 (ход штока 53 мм, диаметр диафрагмы 180 мм) представлен график, на котором наложены обе интерпретации.

Как видно из рисунка 7, интерпретации в характерных положениях штока имеют достаточно высокое совпадение,

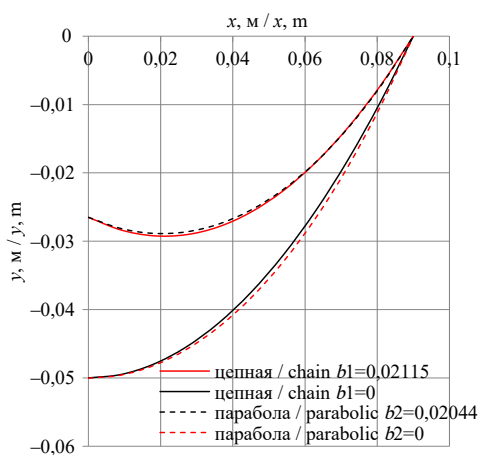


Р и с. 5. График параболической интерпретации
F i g. 5. Graph of parabolic interpretation

⁷ Френкель Н. З. Гидравлика. Учебное пособие: Учебник, физика. М. : Книга по Требованию, 2021. 452 с.



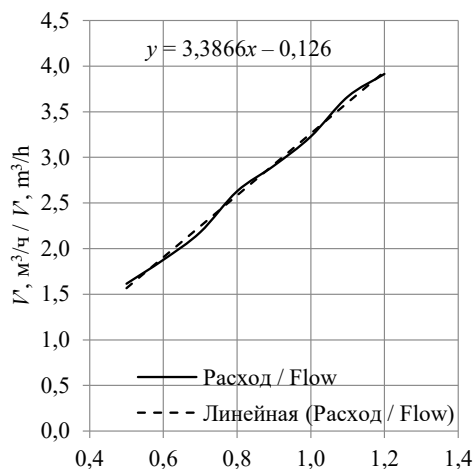
Р и с. 6. График цепной интерпретации
F i g. 6. The graph of chain interpretation



Р и с. 7. График наложения параболической и цепной интерпретации

F i g. 7. Graph of superposition of parabolic and chain interpretation

поэтому для построения расходной характеристики ДН воспользуемся параболической интерпретацией (рис. 8). Для построения данной зависимости скорости штока ДМН принимались синусоидальными с амплитудами, взятыми с экспериментальных графиков перемещения штока на различных частотах.



Р и с. 8. График зависимости расхода от частоты с диафрагмой типа 30

F i g. 8. Flow-frequency dependence graph with diaphragm type 30

Как видно из данного графика, зависимость $\dot{V} = F(f)$ приближается к линейной с уравнением прямой линии $y = 3,3866x - 0,126$ и согласуется с экспериментальной зависимостью в пределах 4 % [10; 11].

Обсуждение и заключение

Анализ работы насосного оборудования объемного действия и условий их применения позволил выявить нишу, где эффективно применение двухконтурных мембранных насосов (детандеров), работающих от располагаемого напора гидравлической сети. Двухконтурные мембранные насосы целесообразно оснащать тарельчатыми диафрагмами, связанными между собой штоком, например, от автотранспортных средств, а привод их осуществлять от располагаемого напора гидравлической сети. Для повышения эффективности работы и дальнейшего использования необходимо прогнозировать гидравлические характеристики по геометрическим параметрам мембран и циклу их работы в динамике.

Исходя из поставленной цели, с использованием методов идеализации из дифференциальной геометрии,

физического эксперимента, математической статистики получены зависимости объема от перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой и объемного расхода, от скорости перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой с конкретными геометрическими параметрами для параболической и цепной линии. Проведена экспериментальная проверка вытесняемого расхода от перемещения точки крепления к штоку для диафрагмы типа 30.

На основании полученных зависимостей объемного расхода от скорости перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой с конкретными геометрическими параметрами для параболической и цепной линии построены

графики объемного расхода от частоты рабочего цикла. Для практической реализации предложены зависимости для построения гидравлической характеристики двухконтурного мембранного насоса, полученные на основе параболической интерпретации. Гидравлические характеристики двухконтурного мембранного насоса приближаются к уравнению прямой линии и согласуются с экспериментальными зависимостями в пределах 4 %. Прогнозирование достоверных гидравлических характеристик двухконтурных мембранных насосов на стадии их создания позволит повысить эффективность систем тепло- и водоснабжения промышленных и сельскохозяйственных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности работы дожимающих газовых компрессоров при переменном начальном давлении / К. А. Бельшева [и др.] // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 47–54. URL: <https://elck.ru/33YENr> (дата обращения: 03.02.2023).
2. Cryogenic Scroll Expander for Claude Cycle with Cooling Power of 10 to 100 Watts at 4.2 K / J. Manzagol [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2002. Vol. 613. P. 267–274. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1472030>
3. Iglesias A., Favrat D. Innovative Isothermal Oil-Free Co-Rotating Scroll Compressor – Expander for Energy Storage with First Expander Tests // Energy Conversion and Management. 2014. Vol. 85. P. 565–572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.106>
4. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53, Issue 7–8. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>.
5. Francis J. A Discussion on Air Quality Standards ISO 8573.1 and ISO 12500 // Compressed Air Best Practices Magazine. 2009. P. 26–32.
6. The Estimation of Thermal Conditions of Highly-Cooled Long-Stroke Stages in Reciprocating Compressors / V. L. Yusha [et al.] // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 264–269.
7. Vetter H. The Sulzer Oil-Free Labyrinth Piston Compressor // International Compressor Engineering Conference, Purdue University. 1972. P. 221–228.
8. Research of Equipment for Pulsed Heating Supply / A. P. Levstev [et al.] // IOP Conference Series. 2019. Vol. 828. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/828/1/012015>
9. Теплопередача кипящего потока в слое рифленого медного пеноматериала с открытыми порами / Д. Чжань [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 423–436. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.423-436>
10. Левцев А. П., Лысяков А. И. Энергонезависимая система отопления с улучшенной энергоэффективностью для сельскохозяйственных помещений // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 1. С. 110–125. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.110-125>

11. Левцев А. П., Кручинкина О. А., Юаньюань Ши. Оценка влияния порядка работы котлоагрегатов на их групповой удельный расход топлива // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 4. С. 577–591. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.577-591>

Поступила 05.02.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 02.03.2023

Об авторах:

Левцев Алексей Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, Researcher ID: B-8620-2019, levtzevap@mail.ru

Лапин Евгений Сергеевич, старший преподаватель кафедры теплоэнергетических систем Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9647-8663>, evgeniy-lapin@yandex.ru

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

Заявленный вклад авторов:

А. П. Левцев – получение зависимостей объема от перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой и объемного расхода, от скорости перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой с конкретными геометрическими параметрами для параболической и цепной линии, анализ и доработка текста.

Е. С. Лапин – подготовка текста, анализ литературных данных, получение экспериментальных зависимостей объема от перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмой.

Д. Чжень – разработка концепции статьи, проверка адекватности, полученных зависимостей объемного расхода, от скорости перемещения точки крепления тарельчатой диафрагмы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Byelyshyeva K.A., Makovyeyeva A.S., Molodov M.A., et al. Gas Booster Compressor Operation at Variable Inlet Pressure. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*. 2016;(1):47–54. Available at: <https://clck.ru/33YENr> (accessed 03.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Manzagol J., d'Harboullé P., Claudet G., Bager G.G. Cryogenic Scroll Expander for Claude Cycle with Cooling Power of 10 to 100 Watts at 4.2 K. *AIP Conference Proceedings*. 2002;613:267–274. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1472030>

3. Iglesias A., Favrat D. Innovative Isothermal Oil-Free Co-Rotating Scroll Compressor – Expander for Energy Storage with First Expander Tests. *Energy Conversion and Management*. 2014;85:565–572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.106>

4. Yusha V.L., Busarov S.S., Gromov A.Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017;53(7–8). doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>.

5. Francis J. A Discussion on Air Quality Standards ISO 8573.1 and ISO 12500. *Compressed Air Best Practices Magazine*. 2009. p. 26–32.

6. Yusha V.L., Dengin V.G., Busarov S.S., et al. The Estimation of Thermal Conditions of Highly-Cooled Long-Stroke Stages in Reciprocating Compressors. *Procedia Engineering*. 2015;113:264–269.

7. Vetter H. The Sulzer Oil-Free Labyrinth Piston Compressor. *International Compressor Engineering Conference, Purdue University*. 1972;221–228.
8. Levstev A.P., Lapin E.S., Grishin B.M., et al. Research of Equipment for Pulsed Heating Supply. *IOP Conference Series*. 2019;828. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/828/1/012015>
9. Zhang D., Sun L., Mao J., et al. Flow Boiling Heat Transfer of Grooved Copper Foam with Open Gap. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):423–436. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.423-436>
10. Levstev A.P., Lysyakov A.I. Energy-Independent Heating System with Improved Energy Efficiency for Agricultural Premises. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):110–125. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.110-125>
11. Levstev A.P., Kruchinkina O.A., Yuan Yuan Shi. Evaluation of Efficiency of Boiler Units in Their Group Specific Fuel Consumption. *Mordovia University Bulletin*. 2017;27(4):577–591. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201704.577-591>

Submitted 05.02.2023; revised 20.02.2023; accepted 02.03.2023

About the authors:

Alexey P. Levstev, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Heat and Power Systems of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, Researcher ID: B-8620-2019, levtzevap@mail.ru

Evgeniy S. Lapin, Senior Lecturer of the Chair of Heat and Power Systems of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9647-8663>, evgeniy-lapin@yandex.ru

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

Authors contribution:

A. P. Levstev – obtaining volume dependences on the movement of the attachment point with a poppet diaphragm and volume flow, on the speed of movement of the attachment point with a poppet diaphragm with specific geometric parameters for a parabolic and chain line, analysis and revision of the text.

E. S. Lapin – text preparation, analysis of literary data, obtaining experimental volume dependences on the movement of the point of attachment with a poppet diaphragm.

D. Chen – development of the article concept, verification of the adequacy of the obtained volume flow rate dependences on the speed of movement of the point of attachment with the poppet diaphragm.

All authors have read and approved the final manuscript.



Оценка триботехнических свойств консолидированных материалов, полученных методом электроискровой обработки

С. А. Величко, А. В. Мартынов , Е. Г. Мартынова

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

 martynov-230685@yandex.ru

Аннотация

Введение. К сельскохозяйственной отрасли глубокой переработки сырья с ориентацией на конечного потребителя относится хлебопекарная промышленность. При производстве хлебобулочных изделий одну из операций технологического процесса выполняют тестоделительные машины вакуумно-поршневого типа, срок службы которых на 30–40 % ниже нормативного. Наиболее перспективным для восстановления изношенных деталей механизма всасывания является метод электроискровой обработки. При выборе материалов электрода важно, чтобы они обладали не только низкой эрозийной стойкостью, но и высокими триботехническими свойствами.

Цель статьи. Выбрать электроискровые покрытия, снижающие изнашивание рабочих поверхностей деталей механизма всасывания при ремонте тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа.

Материалы и методы. Определение свойств электроискровых покрытий проводилось методами неразрушающего контроля с использованием современного научно-исследовательского оборудования, а обработка результатов с использованием программы «Компас-3D».

Результаты исследования. Получены значения физических, механических, фрикционных и триботехнических свойств электроискровых покрытий из бронзы БрОС10-10 и сплава Х15Н60. Суммарная интенсивность изнашивания для покрытия из бронзы БрОС10-10 составила $8,3 \cdot 10^{-12}$, а для сплава Х15Н60 $15 \cdot 10^{-12}$.

Обсуждение и заключение. Суммарная интенсивность изнашивания на машине трения у образцов с покрытием из бронзы БрОС10-10 ниже, чем у базовой пары трения, в 1,4 раза, а у образцов с покрытием из сплава Х15Н60 выше в 1,26 раза. Добавление твердосмазочного покрытия MODENGY на покрытие из сплава Х15Н60 способствует снижению его истирающей способности в 3 раза, а суммарной интенсивности изнашивания — в 1,34 раза относительно базовой пары трения. Расчетно-экспериментальный метод показал низкую интенсивность изнашивания электроискровых покрытий из бронзы БрОС10-10 и сплава Х15Н60 по отношению к материалу деталей механизма всасывания тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа.

Ключевые слова: тестоделительная машина вакуумно-поршневого типа, электроискровая обработка, интенсивность изнашивания, разрушающее напряжение, модуль упругости, фрикционные параметры

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Величко С. А., Мартынов А. В., Мартынова Е. Г. Оценка триботехнических свойств консолидированных материалов, полученных методом электроискровой обработки // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 79–99. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.079-099>

Original article

Assessment of Tribotechnical Properties of Consolidated Materials Obtained by Electrosark Processing

S. A. Velichko, A. V. Martynov✉, E. G. Martynova

National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)

✉ martynov-230685@yandex.ru

Abstract

Introduction. The bakery industry is an agricultural industry of high-level processing of raw materials focuses on the end-consumer. In the production of bakery products one of the operations of the technological process is performed by dough dividers of vacuum-piston type, whose service life is 30–40% lower than the normative. The most promising method for restoration of worn parts of the suction mechanism is electrosark processing. When selecting the electrode material, it is important that they have not only low erosion resistance, but also high tribotechnical properties.

Aim of the Article. The article deals with problem of selecting electric coatings to reduce wear of working surfaces of suction mechanism parts during repair of vacuum piston-type dough dividers.

Materials and Methods. The analysis of the properties of electrosark coatings was carried out by nondestructive testing methods using modern research equipment; the results were processed using the Compass-3D program.

Results. There are determined the values of physical, mechanical, frictional and tribotechnical properties of electrosark coatings made of BrOS10-10 bronze and Kh15N60 alloy. The total wear rate for BrOS10-10 bronze coating was $8,3 \cdot 10^{-12}$, and for Kh15N60 alloy $15 \cdot 10^{-12}$.

Discussion and Conclusion. Total wear rate on the friction machine of bronze coated samples is lower than that of basic friction pair in 1.4 times, and of alloy coated samples – higher in 1.26 times. Adding of MODENGY solid-lubricant coating to the coating from the alloy reduces its abrasion ability by 3 times, and the total wear rate – by 1.34 times in comparison with the base friction pair. The used calculation-experimental method showed low wear rate of electrosark coatings of bronze and alloy in relation to the material of parts of the suction mechanism of vacuum-piston-type dough dividing machines.

Keywords: vacuum-piston type dough divider, electric spark treatment, wear rate, destructive stress, modulus of elasticity, friction parameters

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

For citation: Velichko S.A., Martynov A.V., Martynova E.G. Assessment of Tribotechnical Properties of Consolidated Materials Obtained by Electrosark Processing. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):79–99. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.079-099>

Введение

Пищевая индустрия занимается переработкой сельскохозяйственной продукции с ориентацией или на источники сырья, или на конечного потребителя.

Хлебопекарная промышленность относится к сельскохозяйственной отрасли глубокой переработки сырья и обеспечивает население страны продуктами первой необходимости: хлебом,

хлебобулочными и бараночными изделиями.

При производстве хлебобулочных изделий наиболее важным является получение заготовок теста одинаковой массы. Эту операцию выполняют тестоделительные машины¹. Широкое применение в хлебопекарной промышленности по способу нагнетания теста находят тестоделительные машины вакуумно-поршневого типа, достоинством которых является точное деление тестовых заготовок массой от 50 г из ржаной и пшеничной муки. Они бережно относятся к тесту, не травмируют клейковину. К одной из таких машин, широко используемых на территории России и стран СНГ, относится ТД-4 фирмы ЗАО НПП «Восход» (рис. 1) [1].



Р и с. 1. Общий вид тестоделительной машины ТД-4

F i g. 1. General view of the TD-4 dough divider

Срок службы тестоделительных машин при соблюдении всех регламентов эксплуатации, указанных в технической документации, составляет более 10 лет [1]. Однако в реальных условиях эксплуатации срок службы не превышает 6–7 лет [1; 2].

Работоспособность тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа определяет механизм всасывания делительного устройства, при износе деталей которого происходит потеря вакуума и, как следствие, нарушается точность развесовки теста.

В настоящее время ремонт тестоделительных машин осуществляется полной заменой узла механизма всасывания на новый, изготовленный под заказ заводом-изготовителем. Себестоимость такого ремонта достигает 30–40 % от стоимости новой машины, а срок окупаемости составляет 3–4 года в зависимости от номенклатуры хлебобулочных изделий и режима работы оборудования [3; 4].

Анализ методов восстановления деталей показал, что наиболее перспективным для восстановления деталей является метод электроискровой обработки (ЭИО). Из таблицы 1 видно, что источники энергии для формирования электрической искры в газовой среде обладают лучшими энергетическими характеристиками² [5; 6].

Сравнение гальванических методов и электроискровой обработки по технико-экономическому критерию показал, что во втором случае комплексный показатель оценки ниже в 5,1 раза³ [5].

¹ Коляда Е. В. Совершенствование технологии функциональных сортов хлебобулочных изделий // Менеджмент и маркетинг: опыт и проблемы : сб. науч. трудов. Минск : изд-во «Белорусский государственный экономический университет», 2011. С. 207–212. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49207972> (дата обращения: 06.10.2022) ; Широкова Н. В., Гордиенко С. А. Разработка технологии пшеничного хлеба с функциональными добавками // Теория и практика современной аграрной науки : сб. V национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием. Новосибирск, 2022. С. 1139–1141. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48267734> (дата обращения: 06.10.2022).

² Астанин В. К., Пухов Е. В., Емцев В. В. Использование стационарных и нестационарных режимов осаждения электролитических покрытий для восстановления автотракторной техники // Автотранспортная техника XXI века : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. М. : Мегapolis, 2018. С. 105–111.

³ Там же.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Энергетические характеристики термических источников энергии, применяемых для восстановления параметров изношенных деталей

Energy characteristics of thermal energy sources used to restore the parameters of worn parts

Источники энергии / Power sources	Температура пламени, плазмы или дуги, °К / Temperature of flame, plasma or arc, °K	Наименьшая площадь нагрева, мм ² / Smallest heating area, mm ²	Наибольшая плотность мощности энергии в пятне, Вт/мм ² / Maximum power density in the spot, W/mm ²
Газовое пламя / Gas flame	3 000–3 500	1	$5 \cdot 10^2$
Топливо-плазменное пламя / Fuel-plasma flame	4 000–5 000	1	$5 \cdot 10^2$
Дуга в парах / Arc in vapor:			
щелочных металлов / alkaline metals	4 000–5 000	1	$1 \cdot 10^3$
железа / iron	5 000–6 000	1	$1 \cdot 10^3$
Дуга в газах / Arc in gases:			
водород, азот / hydrogen, nitrogen	5 000–8 000	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^3$
аргон, гелий / argon, helium	10 000–20 000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^3$
Микроплазменная дуга / Microplasma arc	–	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^6$
Электронный луч / Electron beam	–	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^7$
Лазерный луч / Laser beam	–	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^8$
Электрическая искра в газовой среде / Electric spark in a gas environment	7 000–20 000	$1 \cdot 10^{-6}$	10^6 – 10^9

Сущность метода электроискровой обработки состоит в том, что под воздействием электрического импульсного разряда в газовой среде происходит преимущественно эрозия материала анода и перенос продуктов эрозии на катод.

В отличие от технологий, где источник тепла и рабочий материал формируются отдельно, электрическая искра как технологический инструмент осуществляет разрушение электрода и формирование на поверхности детали покрытия с измененным поверхностным слоем (ИПС) [7; 8].

В результате высокой мощности энергии в пятне нагрева импульсного действия и перемещения материала в ИПС, в зависимости от выбранных электродных материалов и принятых

режимов в широком диапазоне, изменяются физико-механические свойства рабочих поверхностей деталей, что в конечном итоге позволяет формировать покрытия с высокими триботехническими свойствами.

Прогнозирование высоких триботехнических свойств электроискровых покрытий объясняется не только структурными изменениями, но и особенностями параметров топографии. Их текстура имеет специфический рельеф в виде замкнутых впадин, так называемых масляных карманов (МК). Наличие МК способствует удержанию объема смазки, улучшающего диссипативные характеристики поверхности трения, что способствует снижению интенсивности

изнашивания наносимого металлопокрытия⁴ [9].

Цель исследования – выбор электроискровых покрытий, обеспечивающих снижение интенсивности изнашивания рабочих поверхностей деталей механизма всасывания при ремонте тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа.

Обзор литературы

На этапе выбора материала электрода для восстановления и обеспечения высоких триботехнических свойств, при разработке технологического процесса, применяется расчетно-экспериментальный метод, позволяющий определить соотношение интенсивностей изнашивания создаваемых покрытий с базовыми образцами.

Исследования показали, что расчетная интенсивность изнашивания при упругом контакте пар трения будет определяться по формуле:

$$I = K_2 \cdot \alpha \cdot K_{nv} \cdot p^{1 + \frac{t_y}{2\nu+1}} \times E^{\frac{2\nu t_y}{2\nu+1}} \cdot \Delta^{\frac{\nu t_y}{2\nu+1}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y}, \quad (1)$$

где K_2 – коэффициент, равный $K_2 = 0,5^{t_y-1} \cdot \frac{1}{2\nu} \cdot 2^{\frac{1}{2\nu}} \cdot K_1$; K_1 – коэффициент, зависящий от геометрии и высоты единичных неровностей на поверхностях твердых тел; α – коэффициент перекрытия, равный $\alpha = A_a / A_r$ (A_a – номинальная площадь контакта, A_r – фактическая площадь контакта); K_{nv} – поправочный коэффициент числа циклов до отделения частицы износа; t_y – показатель кривой фрикционной усталости при упругом контакте; ν – параметр формы опорной кривой; E – модуль упругости покрытия (модуль Юнга), кгс/см²;

p – эксплуатационная нагрузка в паре трения, кгс/см²; Δ – комплексная шероховатость поверхности; k – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте; σ_0 – разрушающее напряжение при однократном растяжении ($\sigma_0 = \sigma_2$), кгс/см². Более подробно эти данные представлены в работе Е. Г. Мартыновой⁵.

Во время работы тестоделительной машины происходит приработка деталей механизма всасывания друг к другу. При этом на поверхностях деталей устанавливается равновесная шероховатость, из-за чего влияние параметров микрогеометрии становится минимальным [10–12].

Тогда для приработанных поверхностей молекулярная составляющая коэффициента трения f_M будет определяться по формуле:

$$f_M = 1,4 \sqrt{\frac{\tau_0 \cdot \alpha_\Gamma}{E}} + \beta, \quad (2)$$

где τ_0 (кгс/см²) и β – фрикционные параметры покрытия; α_Γ – коэффициент гистерезисных потерь. Для нанесенного покрытия из сплавов Х15Н60 и бронзы БрОС10-10, $\alpha_\Gamma = 0,04$ [13].

Из выражения (2) следует, что коэффициент трения f_M для приработанных поверхностей практически не зависит от давления в паре трения и их микрогеометрических характеристик.

Устанавливаемая после приработки пар трения равновесная шероховатость поверхностей определяется по выражению [13]:

$$\Delta = \frac{15\tau_0^{5/4}}{E^{3/4} \cdot p^{1/2} \cdot \alpha_\Gamma^{5/4}}. \quad (3)$$

⁴ Мартынова Е. Г. Разработка технологии ремонта тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа с применением метода электроискровой обработки : дис. ... канд. тех. наук. Саранск, 2022. 216 с. URL: https://mrsu.ru/upload/iblock/62c/sqfrimqncqyy1vpultaeykrtahn6h4/Dissertatsiya_Martynova-E.G_.pdf (дата обращения: 06.10.2022).

⁵ Там же.

Тогда формула расчета интенсивности изнашивания пар трения (1), имеющих упругий контакт в случае контактирования приработанных поверхностей, с учетом выражения (3), запишется:

$$I = K_2 \cdot 15^{\frac{2t_y}{5}} \cdot \alpha \cdot K_{iv} \cdot p \times \\ \times E^{\frac{t_y-1}{2}} \cdot \tau_0^{1/2} \cdot \frac{1}{\alpha_r^{1/2}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y} \quad (4)$$

Таким образом, при упругом виде контактного взаимодействия приработанных поверхностей на интенсивность изнашивания влияют механические, физические и фрикционные свойства поверхности изнашивающейся детали и молекулярная составляющая коэффициента трения.

В настоящее время в научной литературе имеется ограниченное количество публикаций, описывающих результаты экспериментальных исследований механических, физических и фрикционных свойств консолидированных материалов, полученных методом электроискровой обработки. Недостаточная изученность свойств покрытий объясняется низким уровнем апробации методик неразрушающего контроля применительно к электроискровым покрытиям.

В последние годы получен ряд ответов на вопросы трибологического материаловедения в области изучения свойств электроискровых металлопокрытий.

Представлены результаты исследования разрушающего напряжения при однократном растяжении σ_0 . Для этого по остаточному отпечатку, равному 1 мм, на глубине 0,1 мм от шарикового наконечника диаметром 2,5 мм фиксировалось

значение максимальной нагрузки. Затем по экспериментальным зависимостям находилось значение σ_0 . Расхождение результатов эталонных образцов по данной методике составило не более 5 %⁶.

Результаты оценки модуля упругости покрытия из сплава Х20Н80 методом инструментального индентирования, основанного на построении диаграммы зависимости нагрузки, приложенной к индентору от глубины его проникновения во время нагружения и разоружения, представлены в ряде работ⁷ [9]. Расхождение результатов эталонных образцов и покрытий из сплава Х20Н80 по данной методике составило не более 7 %.

Для определения фрикционных параметров электроискровых покрытий авторы работ использовали испытательную машину Hegewald & Peschke Inspekt table, обеспечивающую плавную нагрузку на образцы в диапазоне от 1 до 50 000 Н с погрешностью $\pm 0,5$ %⁸ [9]. Размеры полученных отпечатков измерялись с помощью современно измерительного оборудования профилографа – профилометра Form Talysurf фирмы Taylor Hobson. Расхождение результатов эталонных образцов по данной методике составило не более 4 %.

Таким образом, можно отметить, что имеющиеся и хорошо апробированные методы и средства измерения позволяют с высокой степенью достоверности определять физико-механические и фрикционные свойства электроискровых покрытий [14; 15].

Материалы и методы

Для расчета интенсивности изнашивания электроискровых покрытий

⁶ Оценка относительного удлинения покрытий, сформированных методом электроискровой обработки / С. А. Величко [и др.] // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2018. С. 377–381. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36800128> (дата обращения: 01.05.2021).

⁷ Совершенствование методики определения модуля упругости материалов инструментальным индентированием / С. А. Величко [и др.] // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. С. 335–341. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44318698> (дата обращения: 01.05.2021).

⁸ Там же.

по формуле (4) необходимо определить физические, механические и фрикционные свойства.

Для расчета интенсивности изнашивания электроискровых покрытий по формуле (4) наносимых на рабочие поверхности деталей ресурсопределяющего узла механизма всасывания необходимо определить физические, механические и фрикционные свойства [16; 17].

Расчет интенсивности изнашивания покрытий проведен при наибольшей эксплуатационной нагрузке, действующей на детали сопряжения «поршень – камера», равной 3,2 МПа.

Для проведения исследований по определению составляющих параметров на поверхность образцов, изготовленных из сплава ЧН19Х3Ш, были нанесены покрытия из хромоникелевого сплава марки Х15Н60 и оловянисто-свинцовистой бронзы марки БрОС10-10 методом электроискровой обработки на установке «БИГ-5» (фирма SCINTI, Молдова) в ручном режиме с количеством энергии 300 Дж, частотой импульсов 50 Гц, а также удельным временем обработки 27 с/см². Полученная толщина покрытия достаточна для компенсации износов поверхностей деталей механизма всасывания.

Параметр шероховатости R_a на участках основного профиля исследуемого электроискрового покрытия после механической обработки составляет не более 0,2 мкм по ГОСТ 2789-73.

Принятое количество образцов для каждого эксперимента при доверительной вероятности $\alpha_0 = 0,9$, относительной ошибке $\delta = 10\%$ и ожидаемом коэффициенте вариации $V = 0,1$ принято равным 8 шт. [16].

Для определения разрушающего напряжения при однократном растяжении (4) σ_0 были изготовлены образцы размером 15×15×10 мм. В поверхность

испытуемого образца на глубину 0,1 мм вдавливался шариковый наконечник диаметром 2,5 мм до получения остаточного отпечатка диаметром 1 мм⁹ [17]. При этом фиксируется максимальное значение нагрузки P_{\max} .

Затем рассчитывается максимальная твердость H_{\max} по уравнению:

$$H_{\max} = 1,32P_{\max}, \quad (5)$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка, Н.

По экспериментальной зависимости, представленной в другой работе¹⁰, между максимальной твердостью H_{\max} и пределом прочности исследуемых покрытий σ_b находится значение σ_b .

Для проведения эксперимента используется испытательная машина Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН (рис. 2).

Для измерения диаметра отпечатков d в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью измерений $\pm 0,02$ мм использовался анализатор Siams 700, установленный на базу оптического микроскопа Olympus GX51. Повторность измерений на каждом образце составляла 5 вдавливаний.

Измерение модуля упругости покрытий проводится методом инструментального индентирования, основанного на построении диаграммы зависимости нагрузки, приложенной к индентору от глубины его проникновения, во время нагружения и разгрузки¹¹ [18; 19]. Общий вид диаграммы представлен на рисунке 3.

Для получения кривых 1 и 2 (рис. 3) в качестве нагрузочно-разгрузочного устройства используется машина Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН (рис. 4). Для эксперимента были изготовлены образцы размером 15×15×10 мм.

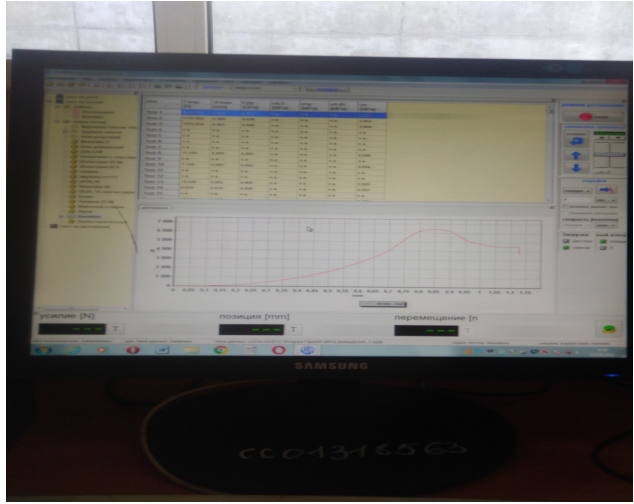
⁹ Оценка относительного удлинения покрытий...

¹⁰ Совершенствование методики определения модуля упругости...

¹¹ Там же.

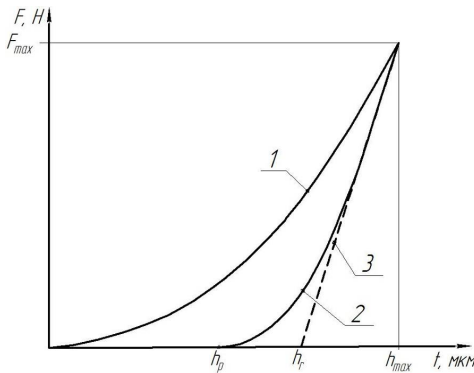


а)



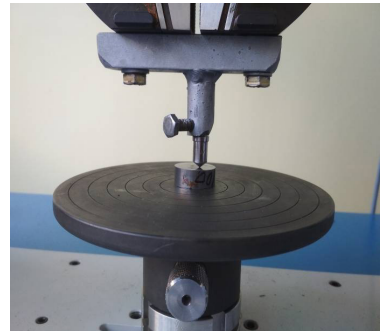
б)

Р и с. 2. Испытательная машина Hegewald & Peschke: а) общий вид; б) интерфейс машины
F i g. 2. Hegewald & Peschke testing machine: а) general view; б) machine interface



Р и с. 3. Зависимость нагрузки от глубины индентирования:
1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгружения;
3 – касательная к кривой разгружения 2; h_r – точка пересечения касательной 3 с осью перемещения; h_p – точка пересечения кривой разгружения 2 с осью перемещения; h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора

F i g. 3. Dependence of load on the indentation depth: 1 – loading curve; 2 – unloading curve; 3 – tangent to the unloading curve 2; h_r – point of intersection of tangent 3 with the axis of movement; h_p – point of intersection of the unloading curve 2 with the axis of movement; h_{max} – maximum depth of indenter introduction



Р и с. 4. Исследование модуля упругости на машине Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН
F i g. 4. Elastic modulus study with Hegewald & Peschke Inspekt table 50 kN

К подвижной (верхней) траверсе крепилось приспособление, в которое устанавливался алмазный индентор Викерса,

а на неподвижную (нижнюю) траверсу устанавливался испытуемый образец (рис. 4)¹² [18; 19].

¹² Там же.

При вдавливании алмазного индентора в поверхность образца фиксируется максимальное значение заданной нагрузки F_{\max} . Зависимость приложенной нагрузки к индентору от глубины его проникновения в поверхность испытуемого образца (линия 1 рис. 3) появляется автоматически на мониторе испытательной машины. При измерении индентор внедряется в испытуемую поверхность образца на минимальную глубину 50 мкм. Затем после выдержки индентора под нагрузкой в течение 15 с осуществляется полная разгрузка образца с получением графической зависимости (линия 2 рис. 3). По полученной линии 2 графически строится касательная линия 3 при нагрузке F_{\max} .

По данным литературных источников¹³ [20], модуль упругости при индентировании E_{IT} равен

$$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}}, \quad (6)$$

где v_s – коэффициент Пуассона испытуемого материала; v_i – коэффициент Пуассона индентора (для алмазного индентора $v_i = 0,07$); E_i – модуль упругости индентора (для алмазного индентора $E_i = 11,4 \cdot 10^5$ Н/мм²); E_r – приведенный модуль упругости в области индентирования, Н/мм².

Модуль упругости E_r в области индентирования равен

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C\sqrt{A_p}}, \quad (7)$$

где C – податливость в контакте индентора с испытуемым образцом;

A_p – площадь поперечного сечения поверхности в контакте (для индентора Виккерса $\sqrt{A_p} = 4,950h_c$, мкм²); h_c – глубина внедрения наконечника в испытуемый образец.

Величина h_c вычисляется по формуле:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon (h_{\max} - h_r), \quad (8)$$

где h_{\max} – глубина, соответствующая максимальной нагрузке F_{\max} (рис. 3), мкм; ε – поправочный коэффициент (для индентора Виккерса $\varepsilon = 3/4$); h_r – точка пересечения касательной 3 с осью t , мкм (рис. 3).

Для определения податливости C (7) используется выражение:

$$C = \frac{dw}{dF} - \frac{dh_c}{dF}, \quad (9)$$

где $\frac{dw}{dF}$ – тангенс угла наклона линии начала разгрузки (определяется по касательной линии 3, рис. 3); $\frac{dh_c}{dF}$ – податливость прибора, равная величине обратной его жесткости¹⁴ [20].

Так как жесткость рамы испытательной машины Hegewald & Peschke Inspekt table 50 кН составляет $1,23 \cdot 10^3$ Н/мм, то податливость рамы, определяемая по формуле (9), будет равна $80,6 \cdot 10^{-7}$ мм/Н. При изменении конструкции верхней траверсы машины (рис. 4) общая жесткость снизилась, а податливость увеличилась до значения $26,7 \cdot 10^{-6}$ мм/Н.

Определение фрикционных параметров τ_0 и β взаимодействия двух твердых тел осуществляется по ГОСТ 27640-88.

Для их определения используется способ, заключающийся в относительном движении деформированных поверхностных слоев с пренебрежимо малой величиной сопротивления.

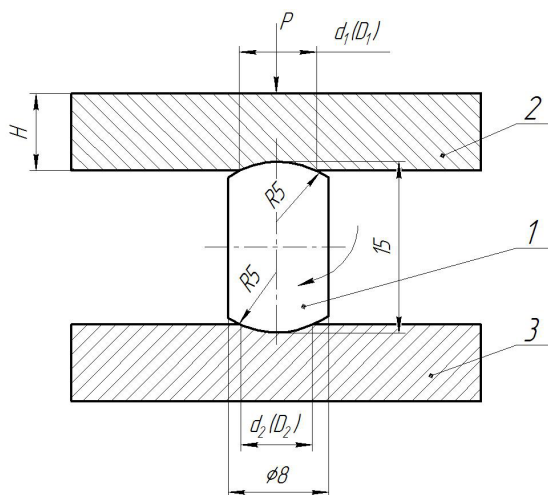
¹³ Sosnovskiy L. A., Makhutov N. A., Troshchenko V. T. Evolution of Ideas on Fatigue of Metals by Volume Loading and Friction // VI Междунар. симпозиум по трибофатике МСТФ 2010. Минск, 2010. С. 77–84. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41104417> (дата обращения: 01.05.2021).

¹⁴ Там же.

Это достигается, если индентор *I* (рис. 5), изготовленный в виде сферы, сдавливать между двумя плоскопараллельными образцами 2 и 3 нормальной силой *P*. После приложения силы индентор необходимо вращать¹⁵ [20].

Для реализации эксперимента разработано устройство, смонтированное на испытательной машине Hegewald & Peschke 50 кН, которая обеспечивает плавную нагрузку на образцы с точностью до 1 Н. Общий вид устройства представлен на рисунке 6.

Особенностью устройства является создание точной нагрузки на образцы с погрешностью ±0,5 % в диапазоне от 1 до 50 000 Н, а также измерение момента трения с погрешностью ±5 % в интервале от 0,1 до 20 Н·м. Все результаты по значениям нагрузки и моменту трения автоматически передаются на ПК сбора данных.



Р и с. 5. Схема определения frictionных параметров τ_0 и β : 1 – вращающийся образец; 2, 3 – плоские контрообразцы; d_1, d_2 – диаметры отпечатков верхнего контрообразца; D_1, D_2 – диаметры отпечатков нижнего контрообразца

F i g. 5. Scheme for determining the friction parameters τ_0 and β : 1 – rotating sample; 2, 3 – flat test pieces; d_1, d_2 – diameters of the upper test piece imprints; D_1, D_2 – diameters of the lower test piece imprints

Вращающийся образец выполнен из стали ШХ15 диаметром 15 мм, а плоские контрообразцы – размером 15×15×10 мм.

При проведении испытаний образец устанавливается относительно края контрообразца на расстоянии не менее 10 мм.

Затем к верхнему контрообразцу в два этапа прикладывается нагрузка. На первом этапе нагрузка должна быть такой, чтобы остались отпечатки диаметром 1–2 мм на контрообразцах.

После выдержки образцов и контрообразцов этой нагрузке в течение 3–6 с проводится вращение образца с частотой 2 об/мин. При повороте на 30–60° и до углового перемещения на 90° непрерывно регистрируется значение момента сил трения *m*. После этого нагрузка снимается, а образец и контрообразцы смещаются друг относительно друга на расстояние не менее 15 мм до другого



Р и с. 6. Общий вид устройства для определения frictionных параметров пар трения

F i g. 6. General view of the device for determining the friction parameters of friction pairs

¹⁵ Там же.

центра отпечатка. Нагрузка при втором нагружении отличается на 15–20 %.

После испытаний образцы снимаются с испытательной установки, обезжириваются, а затем на верхнем и нижнем контрообразце измеряются диаметры отпечатков в двух взаимно перпендикулярных направлениях при первом и втором нагружении с помощью профилографа-профилометра Form Talysurf фирмы Taylor Hobson.

Для измеренных диаметров отпечатков находятся их среднее значение отдельно для верхнего и нижнего контрообразцов:

$$d = \frac{(d_1^0 + d_1^{90}) + (d_2^0 + d_2^{90})}{4},$$

$$D = \frac{(D_1^0 + D_1^{90}) + (D_2^0 + D_2^{90})}{4},$$

где d_1 , D_1 и d_2 , D_2 – диаметры отпечатков на первом и втором контрообразцах соответственно при первом и втором нагружении, мм.

Полученные значения диаметров отпечатков d , D и соответствующие им величины моментов сил трения m и M используются для определения фрикционных параметров τ_0 и β по формулам

$$\tau_0 = \frac{0,75}{\pi(\sigma_2 - \sigma_1)} \cdot \left(\frac{m\sigma_2}{(0,5d)^3} - \frac{M\sigma_1}{(0,5D)^3} \right),$$

$$\beta = \frac{0,75}{\pi(\sigma_2 - \sigma_1)} \cdot \left(\frac{M}{(0,5D)^3} - \frac{m}{(0,5d)^3} \right),$$

где $\sigma_1 = \frac{4P_1}{\pi d^2}$, $\sigma_2 = \frac{4P_2}{\pi D^2}$ – средние величины нормальных контактных напряжений при первом и втором нагружениях соответственно, МПа.

Известно, что сопротивление разрушению при контактом взаимодействии

пар трения, характеризуется кривой фрикционной усталости (кривая Велера). Кривая Велера показывает зависимость усилия, приложенного к поверхности материала F , от числа циклов его повторения n до предельного разрушения материала поверхностного слоя [20].

Испытания поверхностной усталости образцов на фрикционную усталость проведены на трибометре TRB-S-DE (рис. 7).

Для проведения исследований были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 20 мм и толщиной 10 мм. В качестве индентора использовался стальной шарик марки ШХ15 диаметром 3 мм.

Скорость вращения образца задается при условии отсутствия нагрева в паре трения ($9 \cdot 10^{-3}$ м/сек) и автоматически поддерживалась в процессе всего испытания [21].

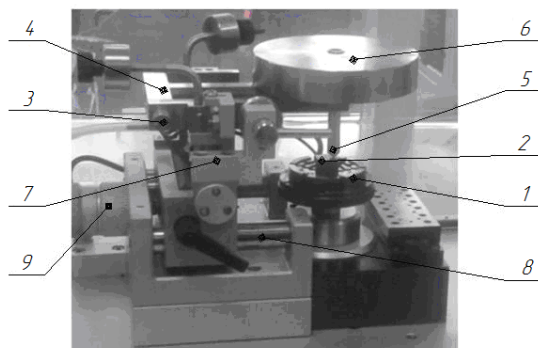
Нагрузка, действующая на индентор, подбирается таким образом, чтобы отсутствовал процесс резания. После определения количества циклов до отделения частиц с поверхности материала по скачку коэффициента трения и образованию усталостных трещин на бороздке нагрузка снижается на 15–20 % и эксперимент повторяется до получения координат второй точки.

По координатам двух точек строится график зависимости количества циклов от величины действующей нагрузки (рис. 8).

Затем с использованием программы «Компас-3D» определяется угол наклона построенной прямой к оси n_e . Найденный угол наклона используется для определения коэффициента фрикционной усталости t_y по формуле:

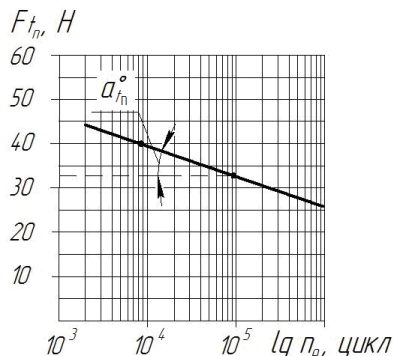
$$t_y = \text{ctg} \alpha_{t_y}. \quad (10)$$

Триботехнические испытания образцов пар трения без покрытий и обработанных методом электроискровой обработки проводили на модернизированной



Р и с. 7. Общий вид трибометра TRB-S-DE: 1 – столик с вращательным движением; 2 – образец; 3 – ось; 4 – подвижная стойка; 5 – индентор; 7 – корпус; 8 – направляющие; 9 – микрометрический винт

Fig. 7. General view of the TRB-S-DE tribometer: 1 – table with a rotational motion; 2 – sample; 3 – axis; 4 – sliding bar; 5 – indenter; 7 – body; 8 – guides; 9 – micrometer screw



Р и с. 8. График зависимости F_{t_n} от n_e
Fig. 8. The graph of the dependence of F_{t_n} on n_e

машине трения СМТ-1М по типу «ко- лодка – ролик» [22]. Машина трения СМТ-1М позволяет автоматически снимать комплекс триботехнических параметров.

Материал и размеры образцов, приня- тые для испытаний, представлены в таблице 2.

Триботехнические параметры, такие как максимальная нагрузка до предза- дира, коэффициент и момент трения, интенсивность изнашивания для базовой пары трения (табл. 2), определялись по ГОСТ 23.224-86.

Для остальных образцов определя- лась только интенсивность изнашивания при нагрузке в паре трения 3,2 МПа. Время стационарных испытаний состав- ляло 8 ч.

Образцы прирабатывались друг к другу до площади прилегания не ме- нее 90 %. Она контролировалась методом планиметрирования пятен контакта с по- грешностью не более 1 %. После этого образцы маркировались, промывались в ацетоне, высушивались и взвешивались.

Подготовленные образцы устанавли- вали на машину трения и приводи- ли в движение подвижный образец

с частотой 300 об/мин (скорость скольже- ния пары трения 0,8 м/с). Использовали смазочный материал (масло industriali- ное И-20А) по ГОСТ 20779-75, подача смазки разовая в картер.

После каждого вида испытаний образцы промывались в ацетоне, просу- шивались, а затем взвешивались на ана- литических весах с точностью измерения до 0,00001 г с трехкратной повторностью.

Интенсивность изнашивания образ- цов определялась по формуле:

$$I = \frac{W}{L}, \quad (11)$$

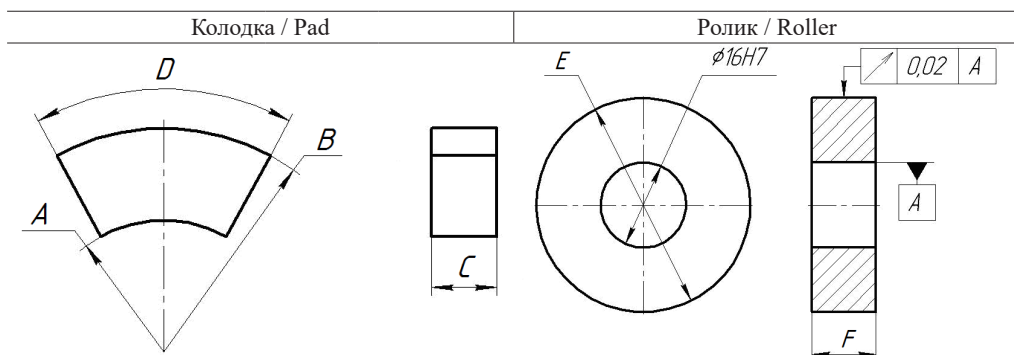
где W – линейный износ образца за прой- денный путь, м; L – пройденный путь трения образца за время испытаний, м.

Линейный износ образцов опреде- лялся по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot F_c}, \quad (12)$$

где ΔG – изменение массы образца от начала до конца испытаний, кг; γ – плот- ность испытуемого материала, кг/м³; F_c – контурная площадь контакта образцов, м².

Параметры образцов для триботехнических испытаний
Parameters of samples for tribotechnical tests



Размеры, мм / Dimensions, mm

A	B	C	D	E	F
25	34	10	45°	50	12
чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	
чугун ЧН19Х3Ш + бронза БрОС10-10 / cast iron ChN19Kh3Sh + bronze BrOS10-10				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	
чугун ЧН19Х3Ш + сплав Х15Н60 / cast iron ChN19Kh3Sh + alloy Kh15N60				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	
чугун ЧН19Х3Ш + сплав Х15Н60 + MODENGY ПТФЭ-А20 / cast iron ChN19Kh3Sh + alloy Kh15N60 + MODENGY PTFE-A20				чугун ЧН19Х3Ш / cast iron ChN19Kh3Sh	

Пройденный путь трения образца за время испытаний [22]:

$$L = N \cdot l, \quad (13)$$

где l – линейный размер поверхности трения сопряженного образца, м; N – число циклов за время прохождения пути l .

Для пары трения интенсивность изнашивания I_z определяется как сумма интенсивностей изнашивания колодки и ролика.

Результаты исследования

Проведенные триботехнические испытания образцов пар трения «колодка – ролик», выполненных из материала деталей механизма всасывания (чугун ЧН19Х3Ш), показали, что суммарная интенсивность изнашивания при эксплуатационной нагрузке в паре трения 3,2 МПа составила

$18 \cdot 10^{-12}$, что относится ко 2-му классу износостойкости [9; 14]. Таким образом, пара трения «колодка – ролик», выполненная из высоколегированного чугуна ЧН19Х3Ш, имеет упругий вид контактного взаимодействия поверхностей [9].

Полученные результаты физических, механических, фрикционных параметров и расчетных значений интенсивности изнашивания электроискровых покрытий представлены в таблице 3.

Согласно представленным в таблице 3 результатам расчетного и экспериментального исследования интенсивность изнашивания высоколегированного чугуна ЧН19Х3Ш с электроискровым покрытием из бронзы БрОС10-10 в 1,461 раза ниже базового образца, а с электроискровым покрытием из сплава Х15Н60 – ниже в 1,31 раза.

**Результаты физических, механических, фрикционных параметров
и расчетных значений интенсивности изнашивания**
Results of physical, mechanical, friction parameters and calculated values of wear rate

Материал покрытия / Coating material	Коэффициенты / Coefficients					ν	p , кгс/см ² / p , kgf/cm ²	Определяемые параметры / Defined parameters					Интен- сивность изнаши- вания, $I \times 10^{-12}$ / Wear rate, $I \times 10^{-12}$	
	$K_2 \times 10^{-2}$	K_n	α	α_r	k			фрикционные / frictional		физи- ческие / physical	механи- ческие / mecha- nical	$I_{\text{теор}}$	$I_{\text{эк}}$	
								t_y	τ_0 , кгс/см ² / τ_0 , kgf/cm ²					β
Бронза BrOC10-10 / Bronze BrOS10-10	1,14	2,3	1,11	0,04	3	1,5	32	5,8	172	0,021	1 140 000	3 820	4,62	
Сплав X15N60 / Alloy Kh15N60	1,22	2,2	1,11	0,04	3	1,5	32	5,7	175	0,023	1 680 000	4 740	5,23	6,8

Таким образом, исследуемые материалы обладают высокими антифрикционными свойствами и их целесообразно использовать для восстановления изношенных рабочих поверхностей деталей.

В таблице 4 представлены результаты триботехнических характеристик колодки и ролика, изготовленных из высоколегированного чугуна ЧН19Х3Ш базовых образцов, полученных по ГОСТ 23.224-86.

Статистические характеристики параметров выборок трибосопряжений базовых образцов
Statistical characteristics of the sample parameters of the tribocouple base samples

Триботехнические параметры / Tribotechnical parameters	Среднее значение \bar{X} / Average value \bar{X}	Значения 95-процентного интервала варьирования / Values of the 95 percent variation interval		Уровень значимости критерия p_w / Significance level of the criterion p_w	Стандартное отклонение σ / Standard deviation σ
		нижнее / lower	верхнее / top		
пара трения 1: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка – чугун ЧН19Х3Ш ($N = 8$) / friction pair 1: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh ($N = 8$)					
1	2	3	4	5	6
Максимальное давление в паре трения $P_{\text{МП}}$, МПа / Maximum pressure in the friction pair $P_{\text{МП}}$, МПа	20,1	18,2	23,9	0,4633	5,26

Окончание таблицы 4 / End of table 4

1	2	3	4	5	6
Оптимальное давление в паре трения $P_{оп}$, МПа / Optimal pressure in the friction pair $P_{оп}$, МПа	14	13,1	18,3	0,6751	2,16
Минимальный коэффициент трения при $P_{оп} = 14$ МПа f_{min} / Minimum coefficient of friction at $P_{оп} = 14$ МПа f_{min}	0,0131	0,0082	0,022	0,8842	0,004
Интенсивность изнашивания колодки при нагрузке $P_{оп} = 14$ МПа I_k / Rate of pad wear under load $P_{оп} = 14$ МПа I_k	$18 \cdot 10^{-12}$	$8,37 \cdot 10^{-12}$	$23,2 \cdot 10^{-12}$	0,6752	$1,59 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика при нагрузке $P_{оп} = 14$ МПа I_p / Rate of roller wear under load $P_{оп} = 14$ МПа I_p	$14 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$	$19,1 \cdot 10^{-12}$	0,3927	$1,1 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания при нагрузке $P_{оп} = 14$ МПа ΣI / Total intensity of wear under load $P_{оп} = 14$ МПа ΣI	$32 \cdot 10^{-12}$	$11,5 \cdot 10^{-12}$	$52,6 \cdot 10^{-12}$	0,3426	$6,3 \cdot 10^{-12}$
Фактор износа Φ / Wear factor Φ	$2,3 \cdot 10^{-12}$	$0,82 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$	0,4230	$0,45 \cdot 10^{-12}$

Из таблицы 4 видно, что интенсивность изнашивания колодки в 1,28 раза больше интенсивности изнашивания ролика, следовательно, в паре трения колодка является изнашивающейся поверхностью, а ролик – изнашиваемой поверхностью, поэтому

электроискровое покрытие наносилось на поверхность колодки.

Результаты экспериментальной оценки интенсивности изнашивания при нагрузке в паре трения 3,2 МПа представлены в таблице 5 [22].

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Результаты экспериментальной оценки интенсивности изнашивания при нагрузке в паре трения 3,2 МПа

Results of experimental evaluation of wear rate at a load of 3.2 MPa in the friction pair

Триботехнические параметры / Tribotechnical parameters	Среднее значение \bar{X} / Average value \bar{X}	Значения 95-процентного интервала варьирования / Values of the 95 percent variation interval		Уровень значимости критерия p_w / The significance level of the criterion p_w	Стандартное отклонение σ / Standard deviation σ
		нижнее / lower	верхнее / top		
пара трения 1: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка – чугун ЧН19Х3Ш ($N = 8$) / friction pair 1: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh ($N = 8$)					
1	2	3	4	5	6
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$6,8 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-12}$	$9,1 \cdot 10^{-12}$	0,5198	$1,8 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	0,3255	$1,7 \cdot 10^{-12}$

Окончание таблицы 5 / End of table 5

1	2	3	4	5	6
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$12 \cdot 10^{-12}$	$4,5 \cdot 10^{-12}$	$18,7 \cdot 10^{-12}$	0,6188	$4,6 \cdot 10^{-12}$
пара трения 2: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка чугун ЧН19Х3Ш с ЭИО из бронзы БрОС10-10 / friction pair 2: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh with elektrosпарк alloying bronze BrOS10-10					
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$4,7 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$	0,5532	$1,06 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$4,77 \cdot 10^{-12}$	0,6784	$0,84 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$8,3 \cdot 10^{-12}$	$3,8 \cdot 10^{-12}$	$10,97 \cdot 10^{-12}$	0,5421	$1,9 \cdot 10^{-12}$
пара трения 3: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка чугун ЧН19Х3Ш с ЭИО из сплава X15H60 / friction pair 3: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh with elektrosпарк alloying bronze BrOS10-10					
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$5,1 \cdot 10^{-12}$	$4,3 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	0,4373	$1,41 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$9,7 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$	$12,8 \cdot 10^{-12}$	0,1564	$2,8 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$15 \cdot 10^{-12}$	$8,8 \cdot 10^{-12}$	$24 \cdot 10^{-12}$	0,1319	$0,5 \cdot 10^{-12}$
пара трения 4: ролик – чугун ЧН19Х3Ш; колодка чугун ЧН19Х3Ш с ЭИО из сплава X15H60 с антифрикционным твердосмазочным покрытием MODENGY / friction pair 4: roller – cast iron ChN19Kh3Sh; pad – cast iron ChN19Kh3Sh with elektrosпарк alloying Ch15N60 with MODENGY antifriction solid-lubricant coating					
Интенсивность изнашивания колодки I_k / Pad wear rate I_k	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$7,4 \cdot 10^{-12}$	0,6131	$1,45 \cdot 10^{-12}$
Интенсивность изнашивания ролика I_p / Roller wear rate I_p	$3,1 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$	$4,62 \cdot 10^{-12}$	0,8572	$0,97 \cdot 10^{-12}$
Суммарная интенсивность изнашивания ΣI / Total wear rate ΣI	$8,7 \cdot 10^{-12}$	$7,4 \cdot 10^{-12}$	$9,7 \cdot 10^{-12}$	0,8234	$0,7 \cdot 10^{-12}$

Расчетные и экспериментальные значения интенсивности изнашивания изнашивающихся образцов представлены на рисунке 9.

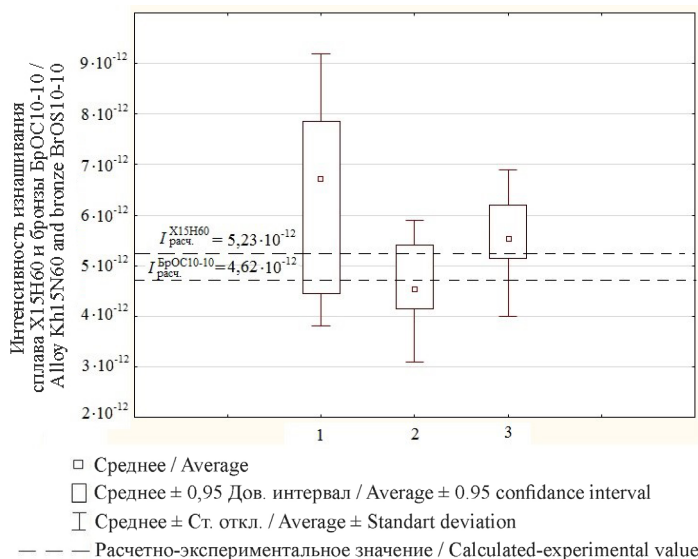
Из рисунка 9 видно, что все теоретические (расчетные) значения интенсивности изнашивания попадают в диапазоне 95-процентного доверительного интервала экспериментальных значений. Полученные результаты показывают высокую степень достоверности выбора электродных материалов с использованием апробированных методик определения параметров

и расчетно-экспериментальной оценки интенсивности изнашивания.

Обсуждение и заключение

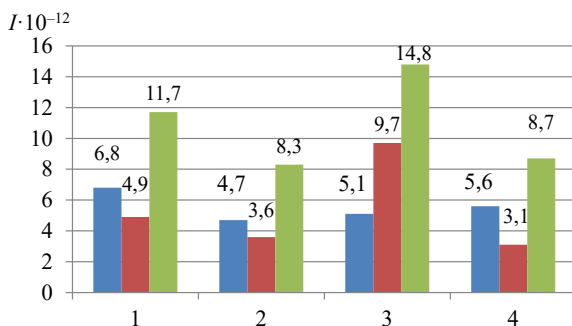
Проведенные в работе триботехнические испытания показали, что интенсивность изнашивания колодки после нанесения покрытия из оловянисто-свинцовой бронзы марки БрОС10-10 становится ниже, чем для базовой пары трения в 1,45 раза. При этом интенсивность изнашивания ролика уменьшилась в 1,36 раза. Таким образом, суммарная интенсивность изнашивания уменьшилась в 1,4 раза (рис. 10)¹⁶ [14].

¹⁶ Мартынова Е. Г. Разработка технологии ремонта тестоделительных машин...



Р и с. 9. Расчетные и эксплуатационные значения интенсивности изнашивания изнашивающихся образцов из высоколегированного чугуна ЧН15Х3Ш: 1 – без покрытия; 2 – после ЭИО электродом из бронзы BrOC10-10; 3 – после ЭИО электродом из сплава Х15Н60

F i g. 9. Calculated and operational values of the wear rate of highly alloyed ChN19Kh3Sh cast iron wear samples: 1 – uncoated; 2 – after elektrosark alloying with bronze BrOS10-10; 3 – after elektrosark alloying with alloy Kh15N60



Р и с. 10. Интенсивность изнашивания пар трения: 1 – колодка ЧН19Х3Ш, ролик ЧН19Х3Ш; 2 – колодка ЧН19Х3Ш+BrOC10-10ЭИО, ролик ЧН19Х3Ш; 3 – колодка ЧН19Х3Ш+Х15Н60ЭИО, ролик ЧН19Х3Ш; 4 – колодка ЧН19Х3Ш+Х15Н60ЭИОМОДЕНГУ, ролик ЧН19Х3Ш; синий – интенсивность изнашивания колодки; красный – интенсивность изнашивания ролика; зеленый – суммарная интенсивность изнашивания

F i g. 10. Wear rate of friction pairs: 1 – pad ChN19Kh3Sh, roller ChN19Kh3Sh; 2 – pad ChN19Kh3Sh+BrOS10-10ESP, roller ChN19Kh3Sh; 3 – pad ChN19Kh3Sh+Kh15N60ESP, roller ChN19Kh3Sh; 4 – pad ChN19Kh3Sh+Kh15N60ESPMODENGY, roller ChN19Kh3Sh; blue – pad wear rate; red – roller wear rate; green – total wear rate

Интенсивность изнашивания колодки после нанесения покрытия из хромоникелевого сплава Х15Н60 уменьшается по отношению к базовой паре трения в 1,33 раза. При этом

интенсивность изнашивания ролика увеличивается в 1,97 раза. Таким образом, суммарная интенсивность изнашивания увеличивается в 1,26 раза (рис. 10).

Для снижения истирающей способности электроискрового покрытия из сплава Х15Н60 необходимо повысить его антифрикционные свойства, используя после ЭИО твердосмазочное покрытие на основе политетрафторэтилена компании «Моделирование и инжиниринг».

Проведенные в работе [14] исследования показали, что «интенсивность изнашивания колодки уменьшилась в 1,21 раза относительно базовой пары трения, а интенсивность изнашивания ролика уменьшилась в 1,58 раза. Таким

образом, суммарная интенсивность изнашивания уменьшилась в 1,34 раза»¹⁷.

Следовательно, электроискровые покрытия из оловянисто-свинцовой бронзы БрОС10–10 и сплава Х15Н60 обладают высокими триботехническими свойствами.

Полученные результаты исследований коррелируют с результатами других авторов и имеют практическую значимость для предприятий технического сервиса, занимающихся ремонтом тестоделительных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арабей Е. В., Балабанов В. Н. Характеристика оборудования для формования и разделки теста // Вестник современных исследований. 2017. № 5-1. С. 120–123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29345309> (дата обращения: 06.10.2022).
2. Алексеев Г. В., Громцев А. С., Лей А. Г. Экспериментальное уточнение условий повышения точности дозирования жидкостей // Техника машиностроения. 2016. Т. 23, № 3. С. 57–63 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27539434> (дата обращения: 06.10.2022).
3. Ivanov V. I., Burumkulov F. K. Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010. Vol. 46, Issue 5. P. 416–423. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>
4. Formation of Thick Electrospark Coatings with Increased Contact Continuity / S. A. Velichko [et al.] // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41, Issue 7. P. 657–660. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X21070248>
5. Влияние молибдена на структуру и свойства электроосажденных сплавов железа и никеля / И. М. Ковенский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 6. С. 134–143. doi: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-6-134-143>
6. Дорогой В. Н., Михлин В. М. Использование нового ресурсосберегающего метода для обслуживания деталей машин // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2014. № 1. С. 69–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (дата обращения: 06.10.2022).
7. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings / S. N. Grigorev [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34, Issue 3. P. 161–165. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366613030070>
8. Ремонт тестоделительных устройств вакуумного типа методом электроискровой наплавки / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Хлебопечение России. 2004. № 2. С. 34–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19069614> (дата обращения: 06.10.2022).
9. Velichko S. A., Martynov A. V., Kolomeichenko A. V. Surface Profile Formed by Electric Discharge Machining // Russ. Engin. Res. 2019. Vol. 39. P. 982–985. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19110182>
10. Определение модуля упругости электроискровых покрытий инструментальным индентированием / С. А. Величко [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 91–97. doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_1_91

¹⁷ Там же.

11. Сивцов В. Н. Применение электроискровой обработки и клея-компаунда для восстановления посадочных отверстий корпусных деталей машин // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2021. № 37. С. 23–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46223224> (дата обращения: 06.10.2022).
12. Сивцов В. Н. Восстановление ресурсных деталей машин // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2016. № 22. С. 21–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29154929> (дата обращения: 06.10.2022).
13. Ильин К. А. Влияние шероховатости поверхности на триботехнические показатели поверхностей // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. 2019. Т. 2, № 9. С. 1103–1106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42391481> (дата обращения: 06.10.2022).
14. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 302–320. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>
15. Величко С. А., Мартынова Е. Г., Иванов В. И. Оценка предельного состояния тестодетальных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 448–463. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>
16. Стопалов С. Надежность тракторов. Сбор и обработка информации для оценки надежности в реальной эксплуатации // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2011. № 12. С. 27–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22598156> (дата обращения: 06.10.2022).
17. Вовк Л. П. К определению комплекса механических характеристик неоднородных материалов ударным вдавливанием индентора // Заводская лаборатория. 2003. № 1. С. 45–48.
18. Булычев С. И., Калмакова А. В., Кравченко А. Н. Определение модуля Юнга по твердости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75, № 9. С. 63–66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (дата обращения: 01.05.2021).
19. Богодухов С. И., Гарипов В. С., Солосина Е. В. Определение модуля упругости различных материалов с применением средств тензометрии // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 4. С. 289–294. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21638519> (дата обращения: 01.05.2021).
20. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method / V. O. Startsev [et al.] // Polymer Science. Series D. 2017. Vol. 10, Issue 4. P. 313–317. doi: <https://doi.org/10.1134/s1995421217040141>
21. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 218–233. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
22. Трибологические характеристики и коррозионная стойкость покрытий, полученных методами электроискрового легирования, импульсного катодно-дугового испарения и гибридной технологии с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr-Al₂O₃ / А. Д. Сытченко [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. №. 2. С. 73–79. doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79>

Поступила 08.10.2022; одобрена после рецензирования 02.12.2022; принята к публикации 15.12.2022

Об авторах:

Величко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, Researcher ID: G-9021-2018, velichko2005@yandex.ru

Мартынов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, Researcher ID: AAR-8786-2020, martynov-230685@yandex.ru

Мартынова Елена Геннадьевна, преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, Researcher ID: C-5023-2019, el.mart2012@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

С. А. Величко – формулирование основной концепции исследования и анализ результатов.

А. В. Мартынов – составление плана статьи и ее написание.

Е. Г. Мартынова – экспериментальные исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Arabey E.V., Balabanov V.N. Characteristics of Equipment for Forming and Cutting Dough. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2017;(5-1):120–123. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29345309> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Alexeev G.V., Gromcev A.S., Leu A.G. Experimental Revision of the Conditions of Increasing to Accuracy Dozirovaniya Liquids. *Tekhnika mashinostroeniya*. 2016;23(3):57–63 Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27539434> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

3. Ivanov V.I., Burumkulov F.K. Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010;46(5):416–423. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>

4. Velichko S.A., Kravchenko I.N., Martynov A.V., Martynova E.G. Formation of Thick Electrospark Coatings with Increased Contact Continuity. *Russian Engineering Research*. 2021;41(7):657–660. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X21070248>

5. Kovenskiy I.M., Koreshkova E.V., Kulemina A.A., Chaugarova L.Z. Effect of Molybdenum on the Structure and Properties of Electrodeposited Alloys of Iron and Nickel. *Oil and Gas Studies*. 2021;(6):134–143. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-6-134-143>

6. Dorogoy V.N., Mikhlin V.M. Use of a New Resource-Saving Method for Service of Details of Machines. *Gruzovoe i passazhirskoe avtokhozyaystvo*. 2014;(1):69–72. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

7. Grigor'ev S.N., Kovalev O.B., Kuzmin V.I., et al. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings. *Journal of Friction and Wear*. 2013;34(3):161–165. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068366613030070>

8. Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I., Molodykh A.V., Yevsyeyev P.N. [Repair of Vacuum-Type Dough Dividers by Electrospark Surfacing]. *Khlebopechenie Rossii*. 2004;(2):34–36. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19069614> (accessed 06.10.2022). (In Russ.)

9. Velichko S.A., Martynov A.V., Kolomeichenko A.V. Surface Profile Formed by Electric Discharge Machining. *Russ. Engin. Res*. 2019;39:982–985. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19110182>

10. Velichko S.A., Kravchenko I.N., Chumakov P.V., et al. Determination of the Elastic Modulus of Electric Spark Coatings by Instrumental Indentation. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022;(1):91–97. (In Russ., abstract in Eng.) doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_1_91

11. Sivtsov V.N. The Use of Electric Spacing and Glue Compound to Restore the Seating Holes of Cabinet Parts of Machines. *Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University*. 2021;(37):23–27. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46223224> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Sivtsov V.N. Restoration of Resource Machine Details. *Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University*. 2016;(22):21–25. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29154929> (accessed 06.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

13. Ilin K.A. [Influence of Surface Roughness on Tribotechnical Parameters of Surfaces]. *Nauchnye trudy studentov Izhevskoy GSKhA*. 2019;2(9):1103–1106. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42391481> (accessed 06.10.2022). (In Russ.)
14. Verkhoturav A. D., Ivanov V. I., Dorokhov A. S., et al. Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospark Alloying. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(3):302–320. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>
15. Velichko S.A., Martynova E.G., Ivanov V.I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):448–463. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>
16. Stopalov S. [Tractor Reliability. Gathering and Processing Information to Assess Reliability in Real Operation]. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2011;(12):27–35. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22598156> (accessed 06.10.2022). (In Russ.)
17. Vovk L.P. [To Determine the Complex Mechanical Characteristics of Heterogeneous Materials by Indentation Impact]. *Zavodskaya laboratoriya*. 2003;(1):45–48. (In Russ.)
18. Bulychev S.I., Kalmakova A.V., Kravchenkov A.N. Determination of Young's Modulus from Hardness. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2009;75(9):63–66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Bogoduhov S.I., Garipov V.S., Salosina E.V. The Elasticity Modulus of Various Materials by Means of Strain Gauges. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;(4):289–294. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21638519> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., et al. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method. *Polymer Science. Series D*. 2017;10(4):313–317. doi: <https://doi.org/10.1134/s1995421217040141>
21. Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., et al. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(2):218–233. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
22. Sytchenko A.D., Sheveyko A.N., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev P.V. Tribological Characteristics and Corrosion Resistance of Coatings Obtained by Electrospark Alloying, Pulsed Cathodic Arc Evaporation and Hybrid Technology Using TiCNiCr and TiCNiCr—Dy2O3 Electrodes. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2020;(2):73–79. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79>

Submitted 08.10.2022; revised 02.12.2022; accepted 15.12.2022

About the authors:

Sergey A. Velichko, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Professor of the Technical Service Machines Chair, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6254-5733>, Researcher ID: G-9021-2018, velichko2005@yandex.ru

Alexei V. Martynov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Technical Service Machines Chair, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, Researcher ID: AAR-8786-2020, martynov-230685@yandex.ru

Elena G. Martynova, Lecturer of the Chair of Life Safety, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6870-0498>, Researcher ID: C-5023-2019, el.mart2012@yandex.ru

Authors contribution:

S. A. Velichko – formulation of the basic research concept and analysis of the results.

A. V. Martynov – article drafting and writing.

E. G. Martynova – experimental studies.

All authors have read and approved the final manuscript.



Исследование составов и способов подачи новых топлив с добавками сурепного масла в дизель

С. А. Плотников¹✉, А. Н. Карташевич², Г. Э. Заболотских¹

¹ Вятский государственный университет

(г. Киров, Российская Федерация)

² Белорусская ГСХА (г. Горки, Республика Беларусь)

✉ plotnikovsa@bk.ru

Аннотация

Введение. Исследованы физико-химические свойства эмульсии дизельного топлива с сурепным маслом и этанолом. При использовании смесового топлива не производили конструктивные изменения в двигателе, а только усовершенствовали навесное оборудование: систему питания двигателя внутреннего сгорания.

Цель статьи. Определить влияние добавок сурепного масла и этанола в разных количествах в товарное дизельное топливо на показатели, такие как плотность, кинематическая вязкость, низшая удельная теплота сгорания смесей. Определить оптимальную смесь топлив для стендовых испытаний на дизеле.

Материалы и методы. Использовано следующее оборудование: весы лабораторные VIBRAAJH-620CE, пикнометр ПЖ2-10-КШ 7/16, вискозиметр ВПЖ-2, электронный секундомер.

Результаты исследования. Установлена зависимость между плотностью, кинематической вязкостью и концентрацией добавок в смесевые топлива. Отмечена взаимосвязь кинематической вязкости масел и низшей удельной теплоты сгорания. Представлена динамика снижения средней низшей удельной теплоты сгорания смесей относительно увеличения концентрации смесевых топлив.

Обсуждение и заключение. Для дальнейших стендовых испытаний на двигателе были определены 2 смеси 10%СурМ+10%Э+80%ДТ и 25%СурМ+25%Э+50%ДТ. При выборе этих смесей основное внимание уделялось 4 параметрам: кинематической вязкости, плотности, времени стабильности и низшей удельной теплоте сгорания.

Ключевые слова: сурепка, сурепное масло, этанол, дизельное топливо, кинематическая вязкость, плотность, низшая удельная теплота сгорания, зависимость, динамика, смесевое топливо, система питания

Благодарности: авторы выражают признательность сторонним участникам, которые внесли значительный вклад в исследование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Плотников С. А., Карташевич А. Н., Заболотских Г. Э. Исследование составов и способов подачи новых топлив с добавками сурепного масла в дизель // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 100–113. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.100-113>



The Study of Compositions and Methods of Supplying New Fuels with Additives of Brassica Rapa Oil to the Diesel

S. A. Plotnikov^a✉, A. N. Kartashevich^b, G. E. Zabolotskikh^a

^a Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

^b Belarusian State Agricultural Academy

(Gorki, Republic of Belarus)

✉ plotnikovsa@bk.ru

Abstract

Introduction. Physico-chemical properties of the diesel fuel emulsion with Brassica rapa oil and ethanol have been studied. The use of blended fuel does not make structural changes in the engine, but only the improvement of the attachments: the power supply system of the internal combustion engine.

Aim of the Article. The article aims at determining the effect of additives of Brassica rapa oil and ethanol in commercial diesel fuel in different quantities on such indicators as density, kinematic viscosity, and the lowest specific heat of combustion of mixtures and determining the optimal mixture of fuels for bench tests on the diesel.

Materials and Methods. There were used the following equipment: laboratory scales VIBRAAJH-620CE, pycnometer PZh2-10-KSh 7/16, viscosimeter VPZh-2, and electronic stopwatch.

Results. The dependence between the density, kinematic viscosity and concentration of additives in blended fuels has been determined. The relationship between the kinematic viscosity of oils and the lower specific heat of combustion has been noted. The dynamics of a decrease in the average lower specific heat of combustion of blends relative to an increase in the concentration of blended fuels is presented.

Discussion and Conclusion. For bench tests on the engine, there were selected two blends 10% Brassica rapa +10% Ethanol+80% Diesel and 25% Brassica rapa +25% Ethanol +50% Diesel. When selecting the mixtures, the focus was on 4 parameters: kinematic viscosity, density, stability time, and lower specific heat of combustion.

Keywords: Brassica rapa, Brassica rapa oil, ethanol, diesel fuel, kinematic viscosity, density, lower specific heat of combustion, dependence, dynamics, mixed fuel, power system

Acknowledgements: The authors would like to thank the outside contributors who made significant contributions to the study.

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

For citation: Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Zabolotskikh G.E. The Study of Compositions and Methods of Supplying New Fuels with Additives of Brassica Rapa Oil to the Diesel. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):100–113. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.100-113>

Введение

В настоящее время все чаще встает вопрос развития альтернативной энергетики. Это связано с дефицитом энергоносителей и увеличением их стоимости [1].

Technologies, machinery and equipment

Для экономии ископаемых энергоресурсов необходимо внедрение новых технологий энергосбережения. К такому можно отнести, например, альтернативные виды топлив для

автотракторных дизельных двигателей на основе растительных масел. Однако по причине различий физико-химических и энергетических свойств альтернативных топлив использование их в чистом виде в двигателях ограничено по ряду конструктивных причин. Они вносятся в классическое дизельное топливо (ДТ) в виде добавок [1; 2].

Необходимо создать такой состав смесового топлива, который будет близок к чистому минеральному ДТ по физико-химическим свойствам (плотности, кинематической вязкости и т. д.), позволит при этом сохранить моторные качества двигателя и снизить эмиссию выхлопных газов. Важно отметить, что при использовании выведенного в статье состава смесового топлива не будет производиться конструктивных изменений в двигателе, а только усовершенствование навесного оборудования (системы питания ДВС).

Использование масел в производстве биодизельного топлива находит активное применение уже несколько лет, например в странах Европы. Для производства этого топлива применяют метиловый эфир рапсового масла, который вносится в чистое ДТ¹ [3]. Данный вид топлива позволяет снизить содержание вредных веществ в процессе работы двигателя, таких как сажа, формальдегид, оксиды азота, углеводороды, оксид углерода, диоксид серы, бензоперен [4; 5]. Эти и многие другие компоненты негативно действуют как на здоровье человека, так и на окружающую среду. Но производство метилового эфира требует использования сложного дорогостоящего оборудования, что делает получение этого продукта затратным.

В данной статье внимание будет уделено добавке сурепно-этаноловой эмульсии к ДТ, так как по своим физико-химическим свойствам сурепное

масло близко к рапсовому маслу. Кроме того, обе этих культуры хоть и различны в ботаническом отношении, но схожи в сельскохозяйственном плане. Обе они являются сидератами, обогащают в ходе своего роста почву азотом и угнетают рост сорняков. Сурепицу отличает высокая урожайность, а значит, и объем производимого масла будет выше. На данный момент распространение сурепицы на территории РФ нельзя сравнить с более популярным рапсом, хотя она выгодно отличается от рапса своей неприхотливостью и способна произрастать на разнообразных почвах [6].

В. В. Крюков в своих исследованиях обращал внимание на возможность использования топлива на сурепно-минеральной основе для работы автотракторного двигателя, но добавок спиртов к этому смесовому топливу применено не было. В нашем исследовании решено было добавить этиловый спирт к сурепному маслу (СурМ) и ДТ. Выбор именно этого вида спирта основывался на меньшей токсичности и окисляемости относительно, например, метилового спирта. Но спирты в маслах и ДТ практически не растворяются, что приводит к фазовому разделению компонентов. Именно для этой цели необходимо разработать оборудование для топливоподготовки, которое будет готовить однородное топливо при постоянном перемешивании компонентов.

Было проведено исследование необходимой концентрации добавки компонентов. Учитывались такие параметры, как плотность, кинематическая вязкость и низшая удельная теплота сгорания. На основе этих параметров был выявлен ряд зависимостей.

Цель исследования – определение влияния добавок сурепного масла и этанола разных концентраций в чистое

¹ Was ist Biodiesel [Электронный ресурс]. URL: <http://https://www.bioe.ch/biodiesel/was-ist-biodiesel> (дата обращения: 10.10.2022).

дизельное топливо на показатели, такие как плотность, кинематическая вязкость, низшая удельная теплота сгорания смесей, чтобы найти оптимальную смесь для стеновых испытаний на дизеле.

Обзор литературы

Сурепица (лат. *Brassica rapa*) известна человечеству приблизительно 4 000–6 000 лет. Данный вид был примечателен тем, что имел в своем генетическом коде три набора хромосом. Такой обширный генетический потенциал обеспечил создание разнообразных подвидов дикорастущей сурепицы. В результате одомашнивания появились современные овощи и масличные культуры, которые содержали уже два набора хромосом [7]. Позднее сурепицу стали выращивать в Европе. Например, в Древнем Риме она являлась важным продуктом питания, а масло из ее семян служило заправкой для лампад. Позднее сурепица распространилась на Востоке и по всему миру² [8].

Сурепица озимая наиболее приспособлена к климату России. Данный подвид европейского вида репы характеризуется тонким несъедобным корнем, продолжительной стадией яровизации, высокой зимостойкостью. В связи с «утопленностью» точки роста сурепицы в почву эта культура способна успешно противостоять влиянию неблагоприятных факторов зимнего периода [9–11].

А. П. Уханов и Д. А. Уханов активно изучали сурепное масло в качестве добавки к минеральному дизельному топливу [12]. Проведен

хроматографический анализ СурМ и дизельного смесового топлива (жирно-кислотный состав и физико-химические свойства) для оценки целесообразности использования СурМ в качестве добавки для минерального ДТ для автотракторных дизелей. Анализ данных показал обратно пропорциональную зависимость концентрации минерального ДТ в смесовом топливе и жирно-кислотного состава смесового топлива. Так, при увеличении концентрации чистого ДТ до 75 % в смеси был отмечен рост содержания эруковой, стеариновой, бегеновой и арахиновой кислот. Для улучшения качества смешивания ученые предложили метод ультразвуковой обработки при помощи диспергатора УЗДН-2Т. Обработка ультразвуком привела к изменению вида содержащихся в смесовых топливах высших жирных кислот³.

В. В. Крюков продолжил изучать физико-химические свойства сурепного масла. Исходя из результатов анализа сурепного масла с применением хроматографа, удалось вычислить низшую теплоту сгорания и рассчитать элементарный состав, а также разработать систему питания, которая позволяет производить смешивание компонентов, контролируя при этом соотношение биоконпонента в чистом ДТ в зависимости от требуемого режима работы и погодных (температурных) условий эксплуатации двигателя⁴.

В. В. Крюков отмечает, что при росте концентрации СурМ в ДТ наблюдается снижение средней скорости нарастания давления газов в рабочей камере дизеля,

² Tarlach G. The Deep Roots of the Vegetable That ‘Took Over the World’ [Электронный ресурс] // Atlas Obscura. 30 June 2021. URL: <https://www.atlasobscura.com/articles/brassica-rapa-vegetable-domestication> (дата обращения: 10.10.2022).

³ Влияние ультразвуковой обработки биотоплива на показатели работы тракторного дизеля / Д. А. Уханов [и др.] // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : сб. материалов Всероссийской НПК. Пенза : РИО ПГСХА, 2009. С. 11–13.

⁴ Крюков В. В. Оценка эксплуатационных показателей сельскохозяйственного трактора при работе на сурепно-минеральном топливе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2014. 20 с. ; Крюков В. В. Смесовое сурепно-минеральное топливо: результаты экспериментальных исследований и технические решения // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : сб. материалов Всероссийской НПК. Пенза : РИО ПГСХА, 2012. С. 202–204.

а также уменьшение максимального давления цикла, что делает рабочий процесс двигателя на смесевых топливах, в сравнении с работой на чистом ДТ, более «мягким»⁵.

Вторым дополнительным компонентом, который планируется добавить в исследуемую смесь, является этанол (Э). Увеличение его содержания делает рабочий процесс более «жестким», что связано с повышением максимума скорости активного тепловыделения при работе двигателя на смеси этанола с чистым ДТ при частоте 1 200 мин⁻¹. С повышением частоты вращения происходит снижение максимума скорости активного тепловыделения⁶ [13; 14].

Предположительно, добавление сурепного масла к этанолу в равных концентрациях позволит максимально приблизить работу двигателя по моторным характеристикам к работе на чистом ДТ.

Следовательно, мы должны определить такое содержание компонентов СурМ и Э в смесевом топливе на основе ДТ, которое будет соответствовать физико-химическим характеристикам

чистого ДТ (плотности, кинематической вязкости, низшей удельной теплоте сгорания)⁷ [15].

Материалы и методы

Первоначально были изучены физико-химические свойства смесевых топлив. В качестве объектов для исследования были подготовлены смеси сурепного масла, этилового спирта и ДТ разных концентраций: 5%СурМ+5%Эт+90% ДТ, 10%СурМ+10%Эт+80% ДТ, 15%СурМ+15%Эт+70% ДТ, 20%СурМ+20%Эт+60% ДТ, 25%СурМ+25%Эт+50%ДТ. Кроме этого, в каждый образец было добавлено от 0,5 до 1,0 % диспергирующей присадки С-5А для увеличения времени стабильности смесей. Определяли плотность и кинематическую вязкость, а также время стабильности смесей к фазовому разделению.

Использовали физико-химическое (вискозиметр ВПЖ-2, пикнометр ПЖ2-10-КШ 7/16), а также сопутствующее ему (весы лабораторные VIBRAAJH-620CE, электронный секундомер) оборудование (рис. 1).



Р и с. 1. Используемое оборудование: а) пикнометр ПЖ2-10-КШ 7/16; б) весы лабораторные VIBRAAJH-620CE; в) электронный секундомер; д) вискозиметр ВПЖ-2

F i g. 1. The equipment used: а) pycnometer PZh 2-10-KSh 7/16; б) laboratory scales VIBRAAJH-620CE; в) electronic stopwatch; д) viscometer VPZh-2

⁵ Там же.

⁶ Там же.

⁷ Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла // Общество, наука, инновации (НПК-2017): Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. : сб. статей. Киров, 2017. С. 1875–1882.

Необходимо было для каждой пробы определить такие физические величины, как кинематическая вязкость, плотность и время стабильности смеси. Нужно отметить, что опыты проводились при нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) при температуре окружающей среды 20 °С.

Поскольку при использовании пикнометра ПЖ2-10-КШ 7/16 плотность является расчетной величиной, для проведения эксперимента дополнительно понадобились лабораторные весы VIBRAALH-620CE (рис. 1 а, б). Метод и выходные значения были взяты из ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности».

Расчет производился согласно формуле:

$$\rho = \frac{m_{\text{пик. смес.}} - m_{\text{пус. пик.}}}{m_{\text{пик. дис.}} - m_{\text{пус. пик.}}} \cdot 0,99703, \text{ г/см}^3, (1)$$

где $m_{\text{пик. смес.}}$ – суммарная масса, состоящая из массы пустого пикнометра и массы смеси; $m_{\text{пус. пик.}}$ – масса пустого пикнометра; $m_{\text{пик. дис.}}$ – суммарная масса, состоящая из массы пикнометра и массы содержащейся в нем дистиллированной воды; 0,99703 – коэффициент,

характеризующий относительную плотность воды при температуре 20 °С.

Для определения динамической вязкости использовался вискозиметр ВПЖ-2 (диаметр капилляра $d = 0,99$ мм) (рис. 2д).

Расчет кинематической вязкости был произведен по формуле:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \text{ см}^2/\text{с}, (2)$$

где η – динамическая вязкость, г/см·с; ρ – плотность исследуемой жидкости, г/см³.

Время стабильности смеси T было определено в результате визуального наблюдения. С помощью электронного секундомера фиксировался момент фазового разделения образцов смесей [16].

Результаты исследования

На основе результатов исследования (табл. 1) получены наглядные графики.

Как видно из таблицы 1, был проведен анализ 5 образцов ДТ, СурМ и Э. Ниже описываются результаты произведенных наблюдений.

Отмечено, что с увеличением содержания СурМ и Э в ДТ увеличивается кинематическая вязкость (рис. 2). Можно объяснить это тем, что вязкость СурМ существенно выше, чем у ДТ, и составляет $\nu_{\text{СурМ}} = 77,2$ сСт против $\nu_{\text{ДТ}} = 4,5$ сСт.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Результаты исследования

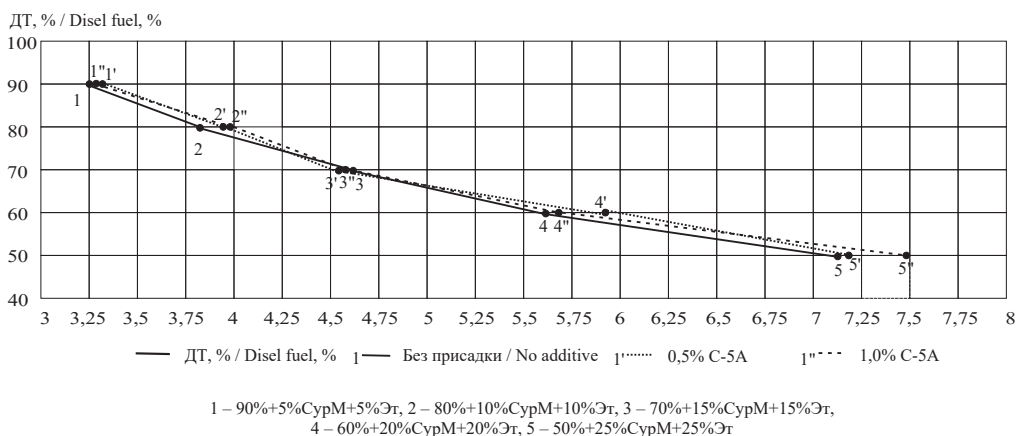
The results of the study

ДТ, % / Diesel fuel, %	СурМ, % / Brassica rapa, %	Эт., % / Ethanol, %	Кинематич. вязкость при $T = 20$ °С, сСт / Kinematic viscosity at $T = 20$ °С, cSt			Плотность при $T = 20$ °С, г/см ³ / Density at $T = 20$ °С, g/cm ³			Время стабильно- сти, мин / Stability time, min		
			Без присад- ки / No additive	0,5 % С-5А	1,0 % С-5А	Без присад- ки / No additive	0,5 % С-5А	1,0 % С-5А	Без присад- ки / No additive	0,5 % С-5А	1,0 % С-5А
90	5	5	3,246	3,322	3,253	0,821	0,816	0,823	>75	78	66
80	10	10	3,838	3,855	3,723	0,818	0,820	0,821	>75	60	52
70	15	15	4,636	4,555	4,440	0,824	0,822	0,825	40	40	33
60	20	20	5,596	5,851	5,659	0,824	0,827	0,829	7	16	18
50	25	25	7,125	7,164	7,469	0,830	0,831	0,834	4,7	11	15

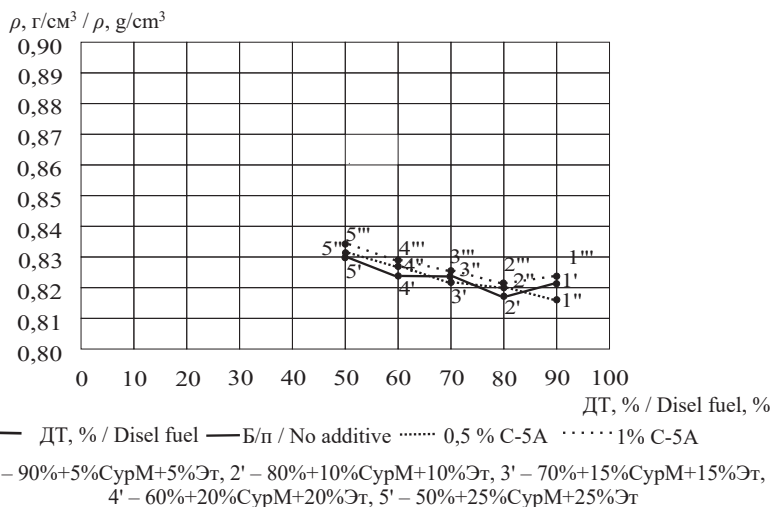
Наличие в смеси этанола снижает общую вязкость смесевоего топлива, но этого недостаточно, чтобы она находилась в рамках, определенных для летнего ДТ (ГОСТ 305–2013 «Топливо дизельное. Технические условия»). Внесение С-5А тоже увеличивает кинематическую вязкость.

Плотность, как и кинематическая вязкость, в смесевых топливах возрастает

при увеличении содержания СурМ и Э, но не так сильно. Наибольшее увеличение плотности смеси на 0,1 г/см³ зафиксировано при 25%СурМ+25%Э+50%ДТ (рис. 3). Таким образом, согласно ГОСТ 305–2013 «Топливо дизельное. Технические условия», плотность чистого ДТ составляет 0,80–0,86 г/см³, а это значит, что все образцы смесей укладываются в эти рамки.



Р и с. 2. Влияние концентрации компонентов (ДТ, СурМ и Э) на кинематическую вязкость смеси
 F i g. 2. The effect of the concentration of components (diesel fuel, Brassica rapa oil, ethanol) on the kinematic viscosity of the mixture



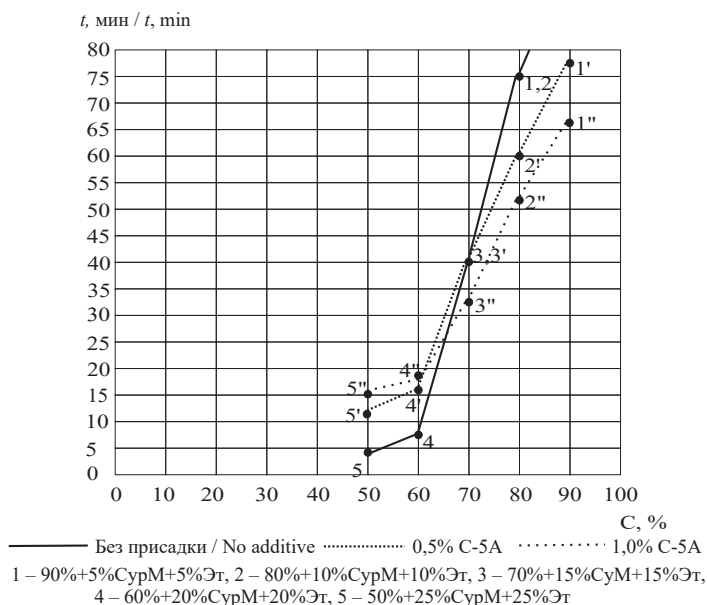
Р и с. 3. Влияние концентрации компонентов на плотность смеси
 F i g. 3. The effect of the concentration of components on the density of the mixture

Экспериментально установлено, что при увеличении содержания СурМ и Э в ДТ снижается время стабильности. Положительное влияние присадки было отмечено с 30 % от общего содержания СурМ и Э (рис. 4).

Отмечена зависимость между кинематической вязкостью масел и низшей удельной теплотой сгорания. Была составлена таблица 2, содержащая вышеизложенные параметры на примере трех масел (хлопковое, рапсовое, сурепное)

и летнего ДТ, для того чтобы проследить взаимосвязь.

График (рис. 5.) показывает, что с ростом кинематической вязкости смесевых топлив снижается низшая удельная теплота сгорания. Предположительно, данный эффект можно объяснить тем, что масла, обладающие наименьшей вязкостью, быстрее испаряются, и содержание газовой фазы, соответственно, выше, а это значит, что фактическая температура возгорания и низшая удельная теплота сгорания топлив будут выше.



Р и с. 4. Влияние концентрации компонентов и наличия присадки в смесях на изменение времени стабильности

Fig. 4. The effect of the concentration of components and the presence of additives in mixtures on the change in stability time

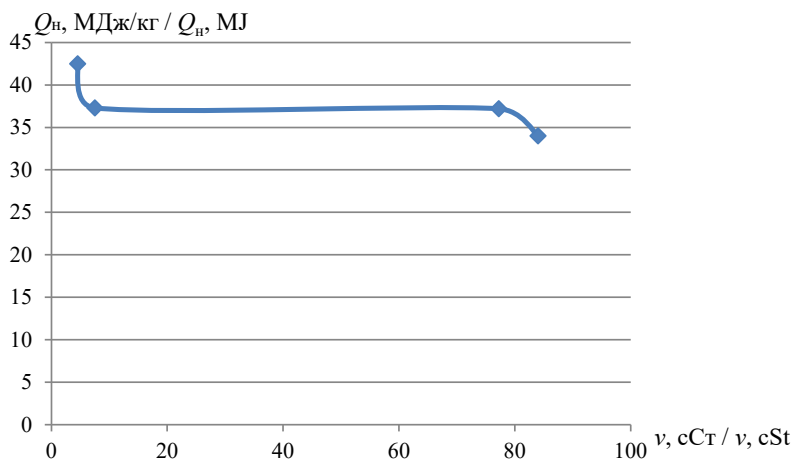
Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Отношение кинематической вязкости растительных масел и ДТ к их низшей удельной теплоте сгорания

Ratio of the kinematic viscosity of vegetable oils and Diesel fuel to their lowest specific heat of combustion

	ХлопокМ / Cotton oil	СурМ / Brassica rapa oil	PM / Rapeseed oil	ДТ / Diesel fuel
ν , cСт / ν , cSt	84	77,2	7,5	4,5
$Q_{н'}$, МДж/кг / $Q_{н'}$, MJ/kg	34	37,2	37,3	42,5

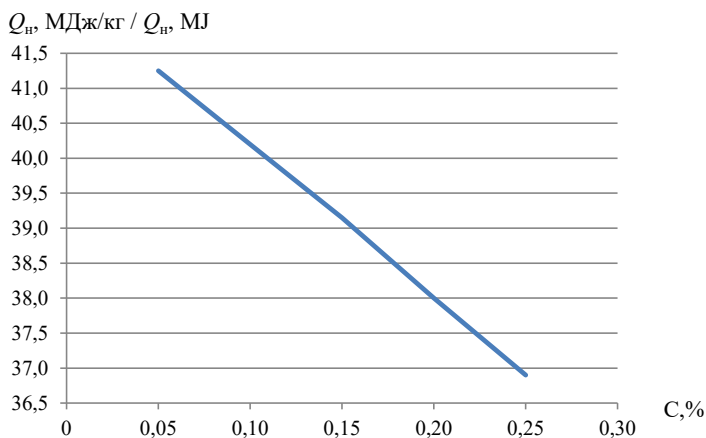


Р и с. 5. Отношение кинематической вязкости растительных масел и ДТ к их низшей удельной теплоте сгорания

F i g. 5. Ratio of the kinematic viscosity of vegetable oils and diesel fuel to their lowest specific heat of combustion

Среди проанализированных видов масел видно, что наиболее близко к ДТ по Q_n рапсовое и сурепное масла, но рапсовое масло уже давно нашло свое применение в производстве альтернативного топлива, тогда как сурепное на данный момент недостаточно изучено в этом отношении. Но кинематическая вязкость СурМ выше вязкости ДТ примерно в 17,2 раза, а это значит, что

в процессе топливоподготовки перед смешением на него придется произвести либо физическое, либо химическое воздействие [17; 18]. Возможно в этом случае применение Э, так как он при $\nu = 1,5 \text{ сСт}$ имеет $Q_n = 30,6 \text{ МДж/кг}$, что позволило бы при постоянном смешивании в равных соотношениях с СурМ добиться $\nu_{\text{ср}} = 39,4 \text{ сСт}$, а $Q_{n(\text{ср})} = 33,9 \text{ МДж/кг}$, при этом средняя вязкость снизится примерно в 2 раза.



Р и с. 6. Снижение $Q_{n(\text{средн.})}$ при увеличении концентрации смеси СурМ:Э:ДТ (5:5:90, 10:10:80, 15:15:70, 20:20:60, 25:25:50)

F i g. 6. A decrease in $Q_{n(\text{средн.})}$ with an increase in the concentration of a mixture of Brassica rapa oil, ethanol and diesel fuel (5:5:90, 10:10:80, 15:15:70, 20:20:60, 25:25:50)

Из данного графика (рис. 6.) видна динамика снижения $Q_{n(\text{средн.})}$ относительно увеличения концентрации смесевых топлив. При 10%СурМ+10%Э+80%ДТ она составляет 40,2 МДж/кг, а при 25%СурМ+25%Э+50%ДТ – 36,9 МДж/кг. Таким образом, согласно ГОСТ «305-2013 Топливо дизельное. Технические условия», Q_n смесей указанных концентраций близка к $Q_{n(\text{ДТлетн.})} = 42,5$ МДж/кг.

Опираясь на вышеизложенные результаты исследования, приходим к выводу, что возникает необходимость усовершенствования системы питания дизеля. Проанализировав двухтопливные системы питания с возможностью автоматического регулирования состава смесевых топлив, установили, что они имеют общий недостаток, а именно невозможность автоматического регулирования оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива при работе двигателя на разных смесевых составах [19; 20].

Обсуждение и заключение

Для дальнейших стендовых испытаний на двигателе были определены 2 смеси 10%СурМ+10%Э+80%ДТ и 25%СурМ+25%Э+50%ДТ. При выборе этих смесей основное внимание уделялось 4 параметрам, а именно: кинематической вязкости, плотности, времени стабильности и низшей удельной теплоте сгорания:

1. Кинематическая вязкость летнего ДТ составляет 4,5 сСт. При увеличении концентрации добавок она увеличивается при 1 % С-5А до 7,5 сСт. Это связано с тем, что $v_{\text{СурМ}}$ выше $v_{\text{ДТ}}$ в 17,2 раза. Это значит, что при использовании смеси 25%СурМ+25%Э+50%ДТ на нее нужно будет оказывать тепловое воздействие перед подачей на форсунки. В смеси 10%СурМ+10%Э+80%ДТ с 1 % содержания С-5А она $Q_n = 3,7$ сСт, что ниже $Q_{n(\text{ДТ})}$.

2. При увеличении концентрации смесевых топлив плотность тоже

несущественно возрастает, но ее динамика выражена менее явно. Только на максимальном содержании добавок 25%СурМ+25%Э+50%ДТ она увеличится на 0,1 г/см³. Согласно ГОСТ 305—2013 «Топливо дизельное. Технические условия», плотность чистого ДТ составляет 0,80–0,86 г/см³, а это значит, что все образцы смесей укладываются в эти рамки.

3. При увеличении содержания СурМ и Э в смеси отмечено снижение времени стабильности. На увеличение времени стабильности влияет добавление присадки, начиная с 30 % от общего содержания СурМ и Э. Лучший результат достигнут при 10%СурМ+10%Э+80%ДТ, он составил 52 мин. То есть применяемое смесевое топливо нуждается в постоянном перемешивании для стабильности смеси.

4. Низшая удельная теплота сгорания СурМ, по сравнению с другими растительными маслами, относительно высока ($Q_{n(\text{СурМ})} = 37,2$ МДж/кг, $Q_{n(\text{ДТ})} = 42,5$ МДж/кг) и примерно равна РМ. РМ уже долгое время активно применяется в мировой промышленности как компонент для производства биодизеля, тогда как СурМ не так хорошо изучено. Но $v_{\text{СурМ}}$ выше $v_{\text{ДТ}}$ примерно в 17,2 раза, следовательно, в процессе топливоподготовки перед смешением на него придется произвести либо физическое, либо химическое воздействие. Возможно в этом случае применение Э, так как он при $v = 1,5$ сСт имеет $Q_n = 30,6$ МДж/кг, что позволило бы при постоянном смешивании в равных соотношениях с СурМ добиться $v_{\text{ср}} = 39,4$ сСт, а $Q_{n(\text{ср})} = 33,9$ МДж/кг, при этом средняя вязкость снизится примерно в 2 раза.

Поскольку смесевые топлива всегда будут в некоторой степени отличаться друг от друга по своим физико-химическим свойствам, необходимо проводить работу над усовершенствованием системы питания⁸ [21; 22]. Изученные

⁸ Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла // Общество, наука, инновации (НПК-2017) : Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. : сб. статей. Киров, 2017. С. 1875–1882.

системы питания для дизеля с добавлением биокомпонента имеют ряд преимуществ. К ним можно отнести наличие установленных перед смесителем специальных дозаторов. Эти дозаторы могут управляться, либо кинематически (посредством тяг со впускным коллектором дизеля) [19], либо электронным способом (через ЭБУ с датчиком температуры растительного топлива и индуктивным датчиком нагрузочного и скоростного

режимов двигателя) [20]. Основным недостатком этих систем является то, что они не имеют возможности автоматического регулирования угла опережения впрыска для оптимальной работы дизеля, хотя разработка таковой позволила бы двигателю работать на любом из предложенных составов смесевых топлив. Это могло бы гарантировать экономичность, надежность и увеличить ресурс ДВС при работе на смесях с растительными добавками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В. М., Деянин С. Н., Слепцов О. Н. Применение в дизелях топлива растительного происхождения // Вести Моск. гос. агроинж. ун-та. 2003. Вып. 4. С. 15–21.
2. Карташевич А. Н., Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 3. С. 144–147. URL: <https://clck.ru/33Zrjc> (дата обращения: 10.10.2022).
3. Effect of Two-Stage Injection on Combustion and Emissions under High EGR Rate on a Diesel Engine by Fueling Blends of Diesel/Gasoline, Diesel/N-Butanol, Diesel/Gasoline/N-Butanol and Pure Diesel / Z. Zheng [et al.] // Energy Conversion and Management. 2015. Issue 90. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.011>
4. Emission and Vibration Analysis of Diesel Engine Fueled Diesel Fuel Containing Metallic Based Nanoparticles / A. Yasar [et al.] // Fuel. 2018. Issue 239. P. 1224–1230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.113>
5. Specific Features of Diesel Fuel Supply under Ultra-High Pressure / J. Zhao [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2020. Issue 179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115699>
6. Виноградов Д. В. Сурепица яровая в южной части нечерноземной зоны // АГРО XXI: электрон. научн. журн. 2010. № 7–9.
7. Brassica Rapa Domestication: Untangling Wild and Feral Forms and Convergence of Crop Morphotypes / A. C. McAlvay [et al.] // Molecular Biology and Evolution. 2021. Vol. 38, Issue 8. P. 3358–3372. doi: <https://doi.org/10.1093/molbev/msab108>
8. Oil Content and Fatty Acids Composition in Brassica Species / Y. Sharafi [et al.] // International Journal of Food Properties. 2015. Vol. 18, Issue 10. P. 2145–2154. doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.968284>
9. Svalof F. Per en Vinterhardig Lagerukahostrybs // Aktuell. 1985. Issue 2. P. 8–9.
10. Grabiek B. Reacjia rzepaku ozimego na nizkie temperatury // Nove rol. 1970. Issue 1. P. 10–11.
11. Dhahad H. A., Chaichan M. T. The Impact of Adding Nano-Al₂O₃ and Nano-Zn to Iragi Diesel Fuel in Terms of Compression Ignition Engines' Performance And Emitted Pollutants // Thermal Science and Engineering Progress. 2020. Issue 18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535>
12. Использование сурепно-минерального топлива в тракторном дизеле / А. П. Уханов [и др.] // Нива Поволжья. 2012. № 2. С. 70–75. URL: <https://clck.ru/33ZrZq> (дата обращения: 10.10.2022).
13. Effects of Gasoline Research Octane Number on Premixed Low-Temperature Combustion of Wide Distillation Fuel by Gasoline/Diesel Blend / H. Liu [et al.] // Fuel. 2014. Issue 134. P. 381–388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.019>

14. Venu H., Madhavan V. Effect of Al₂O₃ Nanoparticles in Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends at Various Injection Strategies: Performance, Combustion and Emission Characteristics // *Fuel*. 2016. Issue 186. P. 176–189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
15. Плотников С. А., Карташевич А. Н., Черемисинов П. Н. Улучшение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом для использования в тракторных дизелях // *Двигателестроение*. 2017. № 4. С. 21–25.
16. Исследование свойств новых топлив для автотракторной техники / С. А. Плотников [и др.] // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева*. 2022. Т. 14, № 1. С. 117–125. doi: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.92.31.014>
17. Lenin M. A., Swaminathan M. R., Kumaresan G. Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine with a Nanofuel Additive // *Fuel*. 2013. Issue 109. P. 362–365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.042>
18. Preferential Cavitation and Friction-Induced Heating of Multi-Component Diesel Fuel Surrogates Up to 450MPa / A. Vidal [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Issue 166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744>
19. Двухтопливная система питания дизеля с автоматическим регулированием состава смеси топлива : патент Российская Федерация 2476716 / Уханов А. П. [и др.]. Аналог.
20. Двухтопливная система питания : патент 2484291 Российская Федерация / Уханов А. П. [и др.]. Прототип.
21. Марков В. А. Теплоэнергетические установки и их системы автоматического управления и регулирования // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2020. № 6. С. 106–130. doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-106-130>
22. Исследование работы автотракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на смесях дизельного топлива с рапсовым маслом / С. А. Плотников [и др.] // *Молочнохозяйственный вестник*. 2017. № 1. С. 110–118. URL: <https://click.ru/33ZsbC> (дата обращения: 10.10.2022).

Поступила 17.10.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 20.02.2023

Об авторах:

Плотников Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovsa@bk.ru

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и машин для природообустройства Белорусской ГСХА (213410, Республика Беларусь, г. Горки, ул. Мичурина, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

Заболотских Георгий Эдуардович, аспирант кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), Researcher ID: GWV-5405-2022, zabolotskikh88@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

С. А. Плотников – общее руководство, постановка задач исследования.

А. Н. Карташевич – теоретический анализ, формулировка выводов.

Г. Э. Заболотских – проведение лабораторных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Belov V.M., Devyanin S.N., Sleptsov O.N. [The Use of Plant-Based Fuels in Diesels]. *Vesti Mosk. gos. agroinzh. un-ta*. 2003;4:15–21. (In Russ.)

2. Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N. [Study of Properties of Alternative Fuels Based on Rapeseed Oil]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2017;(3):144–147. Available at: <https://clck.ru/33Zrjc> (accessed 10.10.2022). (In Russ.)
3. Zheng Z., Yue L., Liu H., et al. Effect of Two-Stage Injection on Combustion and Emissions under High EGR Rate on a Diesel Engine by Fueling Blends of Diesel/Gasoline, Diesel/N-Butanol, Diesel/Gasoline/N-Butanol and Pure Diesel. *Energy Conversion and Management*. 2015;(90). doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.011>
4. Yasar A., Keskin A., Yıldızhan S., Uludamar E. Emission and Vibration Analysis of Diesel Engine Fueled Diesel Fuel Containing Metallic Based Nanoparticles. *Fuel*. 2018;239:1224–1230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.113>
5. Zhao J., Grekhov L., Ma X., Denisov A. Specific Features of Diesel Fuel Supply under Ultra-High Pressure. *Applied Thermal Engineering*. 2020;(179). doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115699>
6. Vinogradov D.V. [Spring Brassica Rapa in the Southern Part of the Non-Chernozem Zone]. *AGRO XXI: elektron. nauchn. zhurn*. 2010;(7–9). (In Russ.)
7. McAlvay A.C., Ragsdale A.P., Mabry M.E., et al. Brassica Rapa Domestication: Untangling Wild and Feral Forms and Convergence of Crop Morphotypes. *Molecular Biology and Evolution*. 2021;38(8):3358–3372. doi: <https://doi.org/10.1093/molbev/msab108>
8. Sharafi Y., Majidi M.M., Goli A.M.H., Rashidi F. Oil Content and Fatty Acids Composition in Brassica Species. *International Journal of Food Properties*. 2015;18(10):2145–2154. doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.968284>
9. Svalof F. Per en Vinterhardig Lagerukahostrybs. *Aktuellt*. 1985;(2):8–9.
10. Grabiek B. Reacjia rzepaku ozimego na nizkie temperatury. *Nove rol*. 1970;(1):10–11.
11. Dhahad H.A., Chaichan M.T. The Impact of Adding Nano-Al₂O₃ and Nano-Zn to Iragi Diesel Fuel in Terms of Compression Ignition Engines' Performance And Emitted Pollutants. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020;(18). doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535>
12. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Chernyakov A.A., Kryukov V.V. [Use of Brassica Rapa Oil and Mineral Fuel in a Tractor Diesel Engine]. *Niva Povolzhya*. 2012;(2):70–75. Available at: <https://clck.ru/33Zrzq> (accessed 10.10.2022). (In Russ.)
13. Liu H., Wang Z., Wang J., He X. Effects of Gasoline Research Octane Number on Premixed Low-Temperature Combustion of Wide Distillation Fuel by Gasoline/Diesel Blend. *Fuel*. 2014;(134):381–388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.019>
14. Venu H., Madhavan V. Effect of Al₂O₃ Nanoparticles in Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends at Various Injection Strategies Strategies: Perfomance, Combustion and Emission Characteristics. *Fuel*. 2016;(186):176–189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
15. Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Cheremisinov P.N. [Improving Blends of Diesel Fuel with Rapeseed Oil for Use in Tractor Diesels]. *Dvigatelistroenie*. 2017;(4):21–25. (In Russ.)
16. Plotnikov S.A., Zabolotskikh G.E., Kantor P.Ya., Vtyurina M.N. Investigation of the Properties of New Fuels for Automotive Equipment. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva*. 2022;14(1):117–125. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.92.31.014>
17. Lenin M.A., Swaminathan M.R., Kumaresan G. Perfomance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine with a Nanofuel Additive. *Fuel*. 2013;(109):362–365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.042>
18. Vidal A., Kolovos K., Gold M.R., et al. Preferential Cavitation and Friction-Induced Heating of Multi-Component Diesel Fuel Surrogates Up to 450MPa. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;(166). doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744>
19. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Sidorov Ye.A., et al. [Dual-Fuel Diesel Fuel System With Automatic Regulation of the Blend Fuel Composition]. Patent 2,476,716 Russian Federation. Analogue. (In Russ.)



20. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Godina Ye.D., Khokhlova Ye.A. [Dual-Fuel Power System]. Patent 2,484,291 Russian Federation. Prototype. (In Russ.)

21. Markov V.A. Heat and Power Plants and Their Automatic Control and Regulation Systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2020;(6):106–130. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-106-130>

22. Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N., Kartashevich A.N., Biryukov A.L. Study of Car-And-Tractor Diesel 4c4ss (4 Cylinder 4 Stroke Supercharger) 11,0/12,5 Work on Diesel Fuel Mixtures with Rapeseed Oil. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*. 2017;(1):110–118. Available at: <https://clck.ru/33ZsbC> (accessed 10.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 17.10.2022; revised 15.02.2023; accepted 20.02.2023

About the authors:

Sergey A. Plotnikov, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovsa@bk.ru

Anatoly N. Kartashevich, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Tractors, Automobiles and Environmental Engineering Machines, Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurin St., Gorki 213410, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

Georgiy E. Zabolotskikh, Postgraduate Student of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), Researcher ID: [GWV-5405-2022](https://orcid.org/0000-0002-5405-2022), zabolotskikh88@yandex.ru

Authors contribution:

S. A. Plotnikov – general management, setting research objectives.

A. N. Kartashevich – theoretical analysis, formulation of conclusions.

G. E. Zabolotskikh – conducting laboratory tests.

All authors have read and approved the final manuscript.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 66.047:633.791

doi: 10.15507/2658-4123.033.202301.114-127

Оригинальная статья



Сверхвысокочастотная хмелесушилка с поярусно расположенными резонаторами

М. В. Просвирякова¹, В. Ф. Сторчевой¹✉, Н. Г. Горячева²,
О. В. Михайлова³, Г. В. Новикова³, А. В. Сторчевой⁴

¹ РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева
(г. Москва, Российская Федерация)

² Академия гражданской защиты МЧС России
(г. Химки, Российская Федерация)

³ Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет
(г. Княгинино, Российская Федерация)

⁴ Московский государственный университет
пищевых производств (г. Москва, Российская Федерация)

✉ energo-air@rgau-msha.ru

Аннотация

Введение. Из анализа хмелесушилок различных систем и конструкций вытекает перспектива сушки хмеля комплексным воздействием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты и конвективного тепла.

Цель статьи. Разработка конструкции малогабаритной СВЧ-конвективной хмелесушилки с обоснованными параметрами и интенсивной технологией сушки свежеубранного хмеля.

Материалы и методы. С учетом обоснованных критериев проектирования хмелесушилки и анализа существующих резонаторов предложена методика разработки хмелесушилки с энергоподводом в электромагнитном поле, включающая требования к конструкционному исполнению, к эксплуатационным и экономическим показателям и технологии. Электродинамические параметры резонатора исследованы по программе CST Studio 2017.

Результаты исследования. Исследованы диэлектрические параметры хмеля и получены функциональные зависимости от влажности при частоте 2 450 МГц. Исследована динамика нагрева хмеля при изменении его фактора диэлектрических потерь в процессе воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты. Разработана конструкционно-технологическая схема радиогерметичной СВЧ-конвективной

© Просвирякова М. В., Сторчевой В. Ф., Горячева Н. Г., Михайлова О. В., Новикова Г. В., Сторчевой А. В., 2023



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

хмелесушилки непрерывно-поточного действия с поярусно расположенными резонаторами для агропредприятий малой мощности. В экранирующем цилиндрическом корпусе поярусно расположены резонаторы: первый и третий резонаторы полусферические, а средний выполнен в виде эллипсоида для обеспечения высокой напряженности электрического поля. Транспортирование сырья происходит путем вращения дисков в шадящем режиме.

Обсуждение и заключение. Ожидаемые удельные энергетические затраты хмелесушилки производительностью 12–13 кг/ч при мощности СВЧ генераторов 4,0 кВт для сушки свежесобранного хмеля влажностью 76–82 % до влажности 11–14%, составляют 0,30–0,33 кВт·ч/кг. Необходимая напряженность электрического поля 2 кВ/см во всех трех резонаторах обеспечивается, следовательно, обеззараживание сырья происходит при температуре 65–70 °С за 5–6 мин пребывания в трех резонаторах. Интенсивность влаговыделения из шишек хмеля при эндогенно-конвективным нагреве возрастает в 5–6 раз, по сравнению с конвективным способом сушки. Внедрение микроволновой технологии сушки с применением конвективного способа испарения и удаления влаги из сушильной камеры позволяет сократить продолжительность процесса, сберечь ценные компоненты шишек для пивоварения.

Ключевые слова: хмелесушилка, СВЧ-конвективный способ, магнетроны воздушного охлаждения, электромагнитное поле сверхвысокой частоты, свежесобранный хмель, диэлектрические параметры

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сверхвысокочастотная хмелесушилка с поярусно расположенными резонаторами / М. В. Просвирякова [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 114–127. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.114-127>

Original article

Ultrahigh-Frequency Hop Dryer with Tiered Resonators

M. V. Prosviryakova^a, V. F. Storchevoy^a ✉, N. G. Goryacheva^b,
O. V. Mikhaylova^c, G. V. Novikova^c, A. V. Stotchevoy^d

^a Russian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)

^b Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia
(Khimki, Russian Federation)

^c Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University
(Knyaginino, Russian Federation)

^d Moscow State University of Food Production
(Moscow, Russian Federation)

✉ energo-air@rgau-msha.ru

Abstract

Introduction. From the analysis of hop dryers of different systems and designs follows the prospect of hop drying by complex influence of the energy of the electromagnetic field of ultrahigh frequency and convective heat.

Aim of the Article. The article aims at developing a small-sized microwave convective hop dryer with justified parameters for intensive drying technology of freshly harvested hops. *Materials and Methods.* Taking into account the justified criteria for the design of a hop dryer and the analysis of existing resonators, there was proposed a methodology for the development of a hop dryer with an energy supply in an electromagnetic field, including requirements for structural design, operational and economic indicators, and technology. The electrodynamic parameters of the resonator were investigated according to the CST Studio 2017 program.

Results. The dielectric parameters of hops are theoretically investigated and functional dependences on humidity at a frequency of 2,450 MHz are obtained. The dynamics of hop heating is investigated when its dielectric loss factor changes during the action of an ultrahigh frequency electromagnetic field. There has been developed a design and technological scheme of a radio-hermetic microwave convective hop dryer of continuous flow action with tiered resonators for low-power agricultural enterprises. Resonators are arranged in tiers in the screening cylindrical housing: the first and third resonators are hemispherical, and the middle one is made in the form of an ellipsoid to ensure a high electric field strength. The transportation of raw materials takes place by rotating the discs in a gentle mode.

Discussion and Conclusion. The expected specific energy costs of a hop dryer with a capacity of 12–13 kg/h at the microwave generator power of 4.0 kW for drying freshly harvested hops with a humidity of 76–82% to a humidity of 11–14% are 0.30–0.33 kWh/kg. The required electric field voltage of 2 kV/cm in all three resonators is provided, therefore, disinfection of raw materials occurs at a temperature of 65–70°C for 5–6 minutes of stay in three resonators. The intensity of moisture release from hop cones during endogenous convective heating increases 5–6 times compared to the convective drying method. The introduction of microwave drying technology using a convective method of evaporation and removal of moisture from the drying chamber reduces the duration of the process, saves valuable components of cones for brewing.

Keywords: hop dryer, microwave convective method, air-cooled magnetrons, ultrahigh frequency electromagnetic field, freshly harvested hops, dielectric parameters

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

For citation: Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Goryacheva N.G., et al. Ultrahigh-Frequency Hop Dryer with Tiered Resonators. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):114–127. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.114-127>

Введение

Хмель возделывают в 25 странах. По производству хмеля Россия занимает 7 место в мире. Валовый сбор хмеля в последние годы, например в Чувашской Республике, составляет 170–175 т, урожайность достигает 16–17 ц/га. Правительство России приняло целевую программу, где особое внимание уделяется послеуборочной обработке, включая разработку высокоинтенсивных хмелесушилок. Задача сушки хмеля сводится к сохранению хорошего товарного вида, цвета и аромата, сохранению максимального количества компонентов горьких веществ (12–22 %), дубильных веществ (2–5 %) и эфирных масел (0,2–0,8 %) для применения в пивоварении [1].

Цель работы – разработка конструкционного исполнения малогабаритной СВЧ-конвективной хмелесушилки с обоснованными параметрами и интенсивной технологией сушки свежесобранного хмеля.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать диэлектрические и теплофизические параметры свежесобранного хмеля и математически описать их функциональные зависимости от температуры и влажности при частоте 2 450 МГц;
- изучить распределение электрического поля в поярусно расположенных нестандартных резонаторах;
- разработать конструктивно-технологическую схему радиогерметичной хмелесушилки непрерывно-поточного действия с поярусно расположенными резонаторами;
- определить эффективные энергетические параметры и режимы работы хмелесушилки.

Обзор литературы

Для сушки используют калориферные сушилки и установки активного вентилирования. Хмелесушилки различных систем и конструкций отличаются числом сушильных камер и ярусов

сушильных сит, способом загрузки и выгрузки хмеля и вентилирования, типом топки. Применение циркуляции теплоносителя с помощью нагнетательной или вытяжной вентиляции увеличивает производительность хмелесушилок, но скорость теплоносителя должна быть не более 0,6 м/с. Обычно теплый воздух от калорифера поступает под нижний слой сушильной камеры.

Имеются хмелесушилки ПХБ-750 [2], ХС-400, мобильная хмелесушилка [3], где повышения термического КПД процесса сушки предлагается достичь за счет предварительного кондиционирования атмосферного воздуха и частичной рекуперацией агента сушки¹. В технологии, реализованной в хмелесушилке с источником электромагнитного поля высокой частоты (40,68 МГц) для равномерной сушки свежесобранного хмеля, необходимо согласовать с высокой точностью толщину слоя, плотность, скорость передвижения транспортеров с температурой нагрева по ярусам².

Поэтому разработка хмелесушилки непрерывно-поточного действия для сушки свежесобранного хмеля с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты и конвективного нагрева с сохранением потребительских характеристик актуальна.

Для агропредприятий разной мощности разработано несколько вариантов хмелесушилок с энергоподводом в электромагнитном поле, обеспечивающих реализацию основных критериев: непрерывность процесса сушки с использованием магнетронов воздушного охлаждения, радиогерметичность сушилки, высокая напряженность электрического поля в сырье, равномерность распределения волн

в резонаторах. Все хмелесушилки содержат металлodieлектрические резонаторы с криволинейными поверхностями: патент № 2774186 [4; 5], патент № 2772992 [6], патент № 2770628 [7], патент № 2772987³ [8].

Все эти сушилки с энергоподводом в электромагнитном поле рационально использовать при сушке хмеля производительностью 150–200 кг/ч. Для фермерских хозяйств, где необходимая производительность хмелесушилки до 50 кг/ч, нужна малогабаритная СВЧ-конвективная сушилка. Поэтому разработка малогабаритной хмелесушилки непрерывно-поточного действия ярусного типа для сушки свежесобранного хмеля с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты и конвективного нагрева с сохранением потребительских характеристик важна.

Материалы и методы

При разработке СВЧ-конвективной хмелесушилки непрерывно-поточного действия после анализа электрофизических характеристик хмеля в зависимости от частоты, влажности, температуры, плотности, по данным И. А. Рогова, теоретически обоснованы

- метод энергоподвода и вид сушильного агента к рабочей камере;
- конструкционные исполнения нестандартных конфигураций резонаторов для трехэтапной сушки хмеля;
- количество и мощность магнетронов с волноводами воздушного охлаждения с волноводными диапазонами частоты, места их расположения на резонаторах для заданной производительности хмелесушилки;
- конструкционное исполнение грузочного и разгрузочного устройств транспортирующего механизма для

¹ Первичная обработка и хранение хмеля [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.ru/6_37565_pervichnaya-obrabotka-i-hranenie-hmelya.html (дата обращения: 02.10.2022).

² Зайцев Г. В. Сушка хмеля в электромагнитном поле высокой частоты : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1995. 18 с.

³ Пчельников Ю. Н. Электроника сверхвысоких частот. М. : Радио и связь, 1981. 96 с.

обеспечения электромагнитной безопасности при непрерывном режиме работы;

- тип и мощность теплогенераторов, вентиляторов и места их расположения на хмелесушилке;

- эффективные электродинамические параметры резонаторов, такие как собственная добротность, напряженность электрического поля, мощность потока излучений;

- эффективные режимы сушки хмеля в каждом резонаторе, а именно: доза воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты, расход конвективного тепла, расход энергии диэлектрического нагрева, общий расход энергии на хмелесушилку;

- выбор системы контроля, регулирования и управления процессом сушки хмеля;

- эксплуатационные затраты на сушку хмеля СВЧ-конвективным способом и традиционным методом⁴.

При проектировании резонаторов нестандартных конфигураций основными критериями служили

- равномерность распределения электрического поля высокой напряженности электрического поля в сырье;

- возможность обеспечения непрерывного режима работы путем использования запердельных волноводов, замедляющих спиралей или ферромагнитных шлюзовых затворов;

- высокая собственная добротность, обеспечивающая повышение термического коэффициента полезного действия;

- допустимая мощность потока излучений около СВЧ-конвективной хмелесушилки (10 мВт/см^2);

- минимальные удельные энергетические затраты на испарение 1 кг влаги из свежубранного хмеля при производительности хмелесушилки, удовлетворяющей фермерским хозяйствам.

С учетом всех этих обоснованных критериев проводили тщательную систематизацию и классификацию всего многообразия объемных резонаторов, предназначенных для термообработки сырья агропредприятий, в том числе сотни резонаторов, разработанных в нашей научной школе, после чего предложена методика разработки хмелесушилки с энергоподводом в электромагнитном поле.

Методика предусматривает анализ комплекса технологических требований к конструкционному исполнению хмелесушилки, к эксплуатационным и экономическим показателям. Основные технологические требования следующие: равномерное распределение потока воздуха; равномерная сушка массы и всех компонентов шишки; сохранение цвета, запаха и целостности шишки; сохранение ценных для пивоварения веществ; применение низкой температуры нагрева; регулирование толщины слоя хмеля; соблюдение скважности процесса.

При разработке конструкционного исполнения хмелесушилки, собранной из трех резонаторов с вогнутыми конфигурациями поверхностей, использовано трехмерное компьютерное моделирование установки. Пользуясь программным обеспечением CST Studio 2017 и модулем Time Domain Solver, проводили исследования напряженности электромагнитного поля, мощности потока излучений, собственной добротности резонаторов⁵. В ходе экспериментальных исследований проводились измерения электрических и физических параметров, характеризующих энергетические и технологические параметры процесса сушки: массы, температуры и влажности хмеля, скорости подачи хмеля и др. Пользовались методами и измерительными приборами, применяемыми на практике. Температуру на поверхности

⁴ Рогов И. А., Адаменко В. А., Некрутман С. В. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.

⁵ Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: МЭИ, 2012. 152 с.

массы хмеля измеряли с помощью тепловизора FLIR B365. Важность шишек хмеля определяли с помощью влагомера Humimeter FLH. Скорость движения воздуха под слоем хмеля в рабочей камере измеряли анемометром и трубкой Пито. Источниками СВЧ-энергии являлись магнетроны с воздушным охлаждением, мощностью 750–850 Вт (MW20MD, MW71ER, CE283GNR, H-MW1317, DL-63L 20S, работающие на частоте 2 450 МГц). Частоту вращения вала электродвигателя контролировали с помощью бесконтактного цифрового тахометра ДЕ22348.

Результаты исследования

Для оценки изменения диэлектрических параметров хмеля в процессе сушки представим структуру в виде «капиллярной модели» по методике И. А. Рогова⁶. Имеются зависимости диэлектрической проницаемости ε и фактора диэлектрических потерь k от влажности:

$$\varepsilon = 81 \cdot \left(\frac{\rho_c}{\rho_e} \right) \cdot (1 - m) \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right),$$

$$k = \left(\frac{\rho_c}{\rho_e} \right) \cdot (1 - m) \cdot \frac{10^6}{2\pi \cdot f \cdot \sigma} \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right). \quad (1)$$

Зная плотность сухих шишек хмеля ($\rho_c = 200 \text{ кг/м}^3$), плотность воды ($\rho_e = 1\,000 \text{ кг/м}^3$), пористость шишек хмеля ($m = 0,5$), влажность хмеля ($W = 76\text{--}82\%$), удельную проводимость жидкости ($\sigma = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$), можно получить формулы (2), пользуясь которыми можно приближенно оценить изменение диэлектрических параметров хмеля в процессе сушки:

$$\varepsilon = 81 \cdot \left(\frac{200}{1000} \right) \cdot (1 - 0,5) \times$$

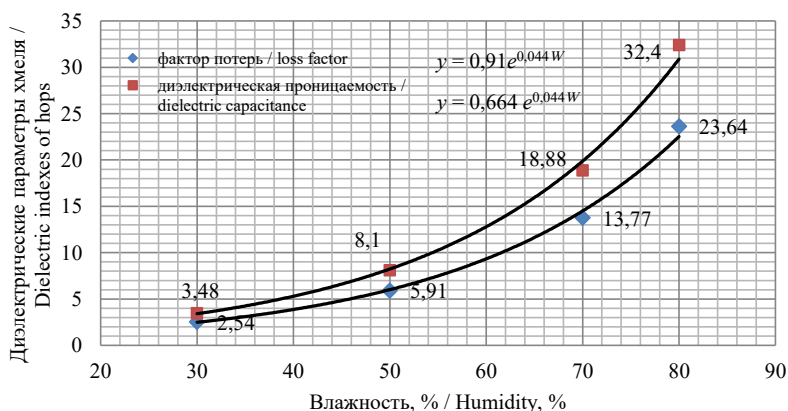
$$\times \left(\frac{W}{1 - W} \right) = 8,1 \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right),$$

$$k = \left(\frac{200}{1000} \right) \cdot (1 - 0,5) \times$$

$$\times \frac{10^6}{2\pi \cdot 2\,450 \cdot 10^6 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right) =$$

$$= 5,91 \cdot \left(\frac{W}{1 - W} \right). \quad (2)$$

На рисунке 1 представлены зависимости диэлектрических параметров хмеля от влажности, рассчитанные по выражениям (2).



Р и с. 1. Зависимость диэлектрических характеристик хмеля от влажности на частоте 2 450 МГц
F i g. 1. Dependence of dielectric characteristics of hops on humidity at 2,450 MHz

⁶ Рогов И. А., Адаменко В. А., Некрутман С. В. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов.

Для исследования динамики нагрева свежесобранного хмеля необходимо учесть изменения его электрофизических параметров в процессе воздействия электромагнитного поля СВЧ (ЭМП СВЧ). Эти изменения приведены в виде эмпирических зависимостей: фактор диэлектрических потерь при температуре 25–60 °С, $k = 3,28 \cdot e^{-0,024 \cdot T}$; теплоемкость при температуре 0–50 °С, $C = 3\,800 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°С}$; плотность хмеля $\rho = 24,12 \cdot e^{0,029 \cdot W}$, при влажности 10–80 % $\rho = 200 \text{ кг/м}^3$.

Известны формулы, описывающие мощность диэлектрических потерь $P_{уд}$ через фактор диэлектрических потерь сырья k и электродинамические параметры E, f системы «резонатор–генератор» (3), а также через физические параметры сырья (4): теплоемкость и плотность⁷ [9; 10]:

$$P_{уд} = 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot k \cdot E^2 = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2, \text{ Вт/см}^3, \quad (3)$$

где E – напряженность электрического поля, В/см; f – частота электромагнитного поля, Гц:

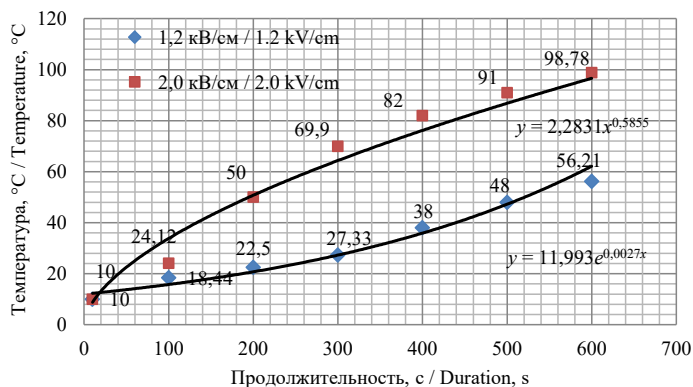
$$P_{уд} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \cdot \rho \cdot C \frac{1}{\eta} = 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}. \quad (4)$$

Из уравнений (3), (4) после интегрирования получено выражение (5), описывающее динамику эндогенного нагрева хмеля в ЭМП СВЧ при разной напряженности электрического поля (ЭП):

$$T = \ln(4,46 \cdot 10^{-9} \cdot E^2 \cdot \tau) / 0,024, \text{ °С/с}. \quad (5)$$

Расчеты показывают, что, например, при напряженности электрического поля, равной 2 000 В/см, и продолжительности воздействия 300 с приращение температуры нагрева хмеля влажностью 72 % составит 69,9 °С. Графики, характеризующие динамику нагрева хмеля при разных напряженностях ЭП, приведены на рисунке 2. Если обеспечить в каждом резонаторе по 2 кВ/см, то за 10 мин в единице объема хмеля температура диэлектрического нагрева составит 99–100 °С. Но температура нагрева хмеля выше 65–70 °С не допускается, следовательно, за 5–6 мин пребывания в трех резонаторах шишки хмеля нагреются до 65–70 °С.

Из анализа разработанных резонаторов вытекает, что в эллипсоидном резонаторе, выполненном в виде тьюбинга, и в конденсаторной части тороидального



Р и с. 2. Динамика нагрева хмеля при разных напряженностях ЭП: 1,2 кВ/см; 2,0 кВ/см

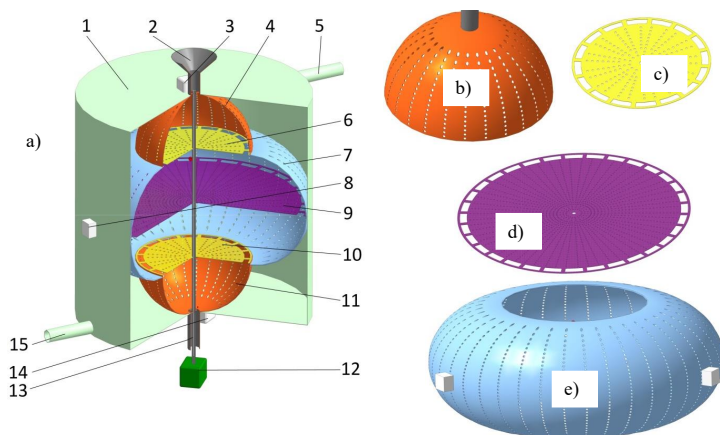
F i g. 2. Dynamics of hop heating at different EF intensities: 1.2 kV/cm; 2.0 kV/cm

⁷ Гинзбург А. С. Расчет проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М. : Агропромиздат, 1985. 336 с. ; Афанасьев А. М. Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса при воздействии интенсивного СВЧ излучения на влагосодержащие объекты сложной структуры : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Волгоград, 2002. 176 с.

резонатора можно обеспечить высокую напряженность электрического поля для стерилизации сырья [11]. Поэтому в соответствии с заданной целью, сушка хмеля в щадящем режиме, и с учетом предварительных расчетов мощности диэлектрического нагрева разработана СВЧ-конвективная хмелесушилка с тремя резонаторами, один из которых выполнен в виде тьюбинга (рис 3).

Хмелесушилка (рис. 3) содержит соосно и попарно расположенные резонаторы 4, 7, 11 в вертикально расположенном

цилиндрическом экранирующем корпусе 1 [12]. Основаниями верхнего 4 и нижнего 11 полусферических перфорированных резонаторов служат соответственно перфорированные неферромагнитные диски 6 и 10, являющиеся основаниями перфорированного эллипсоидного резонатора 7. Внутри него по горизонтальной оси расположен диэлектрический перфорированный диск 9 диаметром меньше диаметра эллипсоида, а диаметры неферромагнитных дисков 6, 10 меньше диаметров полусферических резонаторов 4, 11.



Р и с. 3. Хмелесушилка непрерывно-поточного действия с источниками эндогенно-конвективного нагрева: а) общий вид в разрезе;

- б) верхняя перфорированная полусфера; в) неферромагнитный (это может быть алюминий, медь, золото) перфорированный диск; д) диэлектрический перфорированный диск; е) перфорированный эллипсоидный резонатор; 1 – цилиндрический экранирующий корпус; 2 – запрелдельный волновод; 3 – магнетрон на верхнем полусферическом резонаторе; 4 – верхний полусферический перфорированный резонатор; 5 – запрелдельный волновод-воздухоотвод; 6 – неферромагнитный перфорированный диск; 7 – перфорированный эллипсоидный резонатор из неферромагнитного материала; 8 – магнетроны на поверхности эллипсоидного резонатора; 9 – диэлектрический перфорированный диск; 10 – неферромагнитный перфорированный диск; 11 – нижний полусферический перфорированный резонатор; 12 – электропривод дисков; 13 – запрелдельный волновод – выгрузной патрубок с заслонкой; 14 – магнетроны на поверхности нижнего резонатора; 15 – запрелдельный волновод-воздухоотвод

F i g. 3. Continuous-flow hop dryer with endogenous convective heating sources:

- a) general view in section; b) upper perforated hemisphere; c) non-ferromagnetic (it can be aluminum, copper, gold) perforated disk; d) dielectric perforated disk; e) perforated ellipsoidal resonator; 1 – cylindrical shielding body; 2 – forbidden waveguide; 3 – magnetron on the upper hemispherical resonator; 4 – upper hemispherical perforated resonator; 5 – forbidden waveguide-airguide; 6 – non-ferromagnetic perforated disk; 7 – perforated ellipsoid resonator of non-ferromagnetic material; 8 – magnetrons on the surface of the ellipsoid resonator; 9 – dielectric perforated disk; 10 – non-ferromagnetic perforated disk; 11 – bottom hemispherical perforated resonator; 12 – electric drive of disks; 13 – forbidden waveguide – discharge pipe with a flap; 14 – magnetrons on the surface of the bottom resonator; 15 – forbidden waveguide-air duct

Ширина кольцевых щелей между соответствующими резонаторами и дисками больше продольного размера шишек хмеля. Диски 6, 9, 10 установлены с возможностью регулирования по высоте на вал, вращающийся от электродвигателя 12, расположенного на нижнем основании цилиндрического экранирующего корпуса 1. К верхнему полусферическому резонатору 4 по центру прикреплен запердельный волновод 2 с приемной емкостью, а к нижнему полусферическому резонатору 11 прикреплен запердельный волновод 13 с выгрузной емкостью и заслонкой. Излучатели от магнетронов 3, 14, расположенных на основаниях экранирующего корпуса, направлены в соответствующие полусферические резонаторы. На боковой поверхности экранирующего корпуса со сдвигом на 120 градусов установлены магнетроны 8, так что излучатели направлены в резонатор 7 в виде тьюбинга диаметром, равным диаметру экранирующего корпуса⁸ [12; 13]

Процесс сушки свежесобранного хмеля происходит следующим образом. Закрыть заслонку в приемной емкости 2 и загрузить шишки хмеля. Включить электродвигатель 12, после чего все диски 6, 9, 10 начинают вращаться. Включить калорифер с вентилятором для подачи теплого воздуха (температура воздуха 65–75 °С) через воздухопровод 15 в цилиндрический экранирующий корпус 1. Закрыть заслонку выгрузного патрубка. Открыть заслонку в приемной емкости для подачи сырья через запердельный волновод в верхний резонатор 4. Включить СВЧ-генераторы (магнетроны 3, 8, 10). В процессе вращения дисков 6, 9, 10 шишки хмеля перемешиваются в щадящем режиме, подвергаются воздействию ЭМП СВЧ и нагреваются за счет токов поляризации.

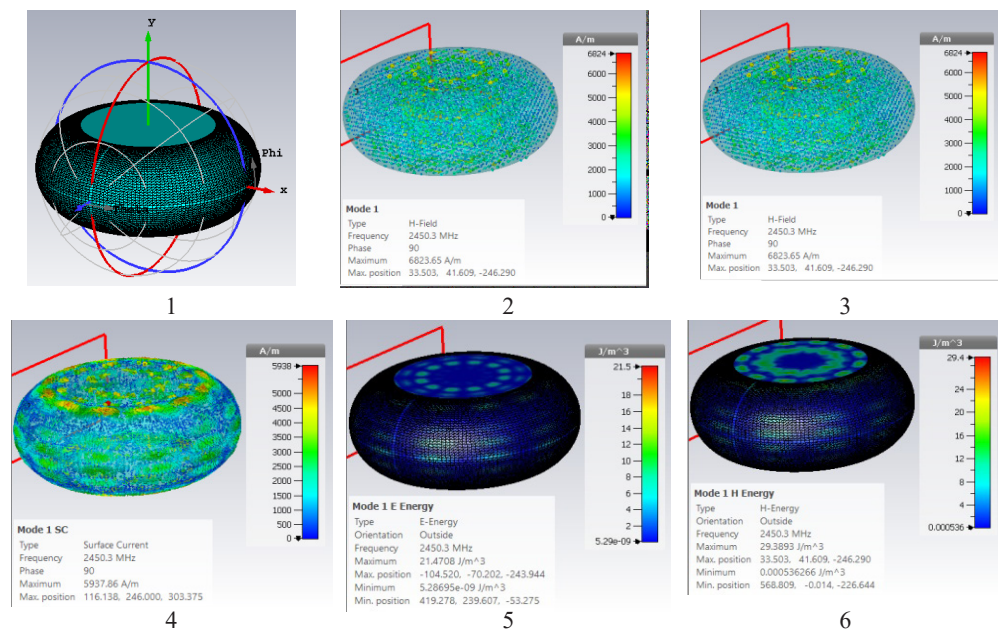
Градиенты температуры, давления и влажности при диэлектрическом

нагреве направлены с центра шишек к периферии, при этом выделенная влага с поверхности шишек испаряется за счет конвективного нагрева теплым воздухом [14; 15]. Отработанный влажный воздух через перфорированные резонаторы 4, 7, 11 и воздухоотвод 5 удаляется. Так как воздухопровод 15 и воздухоотвод 5 расположены по диагонали на основаниях цилиндрического экранирующего корпуса 1, нагретый воздух проникает в слои шишек через поярусно расположенные перфорированные резонаторы. Происходит сушка свежесобранных шишек хмеля за счет диэлектрического и конвективного нагрева. Частично нагретые шишки хмеля высыпаются через кольцевые отверстия между диском 6 и полусферическим резонатором 4 в перфорированный эллипсоидный резонатор и распределяются на поверхности перфорированного диэлектрического диска 9. Здесь в процессе вращения диска 9 шишки хмеля перемешиваются, подвергаются конвективному нагреву и воздействию ЭМП СВЧ другой дозы, чем в верхнем полусферическом резонаторе 4, так как расположены три магнетрона со сдвигом на 120 градусов по периметру эллипсоидного резонатора 7. Поверхностная влага испаряется за счет конвективного нагрева, влажный воздух удаляется через перфорированные резонаторы и воздухоотвод 5. Окончательное высушивание шишек хмеля происходит в нижнем полусферическом перфорированном резонаторе 11, куда с эллипсоидного резонатора сырье высыпается через кольцевое отверстие между ферромагнитным перфорированным диском 10 и поверхностью резонатора 11. Доза воздействия ЭМП СВЧ в этом резонаторе ниже, чем в резонаторе-тьюбинге. Поярусное изменение скорости нагрева сырья, в зависимости от влажности, обеспечивает равномерный эндогенный нагрев шишек хмеля по

⁸ Стрекалов А. В. Электромагнитные поля и волны. Ставрополь : Мир данных, 2006. 169 с.

сечению и сушку, тем самым сохраняет его потребительские свойства. Высушенные шишки хмеля удаляются через запредельный волновод 13 при открытии заслонки на определенную пропускную способность. Ведется контроль температуры и влажности в каждом резонаторе. Расчеты, выполненные по методике С. И. Басакова и В. А. Коломейцева, показывают, что цилиндрический ферромагнитный корпус, толщиной 1,5 см и диаметром, кратным половине длины волны, обеспечивает радиогерметичность хмелесушилки⁹.

Пользуясь трехмерным моделированием объемных резонаторов в программе CST Microwave Studio, SolidWorks, получаем электродинамические параметры резонаторов, в том числе эллипсоидного резонатора (рис. 4)¹⁰. Исследования показывают, что необходимая напряженность ЭП 2 кВ/см во всех трех резонаторах обеспечивается, следовательно, обеззараживание сырья происходит при температуре 65–70 °С за 5–6 мин пребывания в трех резонаторах. Собственная добротность полусферического резонатора составляет 9 000, а эллипсоидного 7 400.



Р и с. 4. Электродинамические параметры эллипсоидного резонатора:

- 1 – распределение электромагнитного поля по осям x, y, z ;
- 2 – напряженность электрического поля, В/м; 3 – напряженность магнитного поля, А/м;
- 4 – поверхностный ток, А/м; 5 – энергия излучения электрической составляющей, Вт/м³;
- 6 – энергия излучения магнитной составляющей, Вт/м³

F i g. 4. Electrodynamics parameters of ellipsoid resonator:

- 1 – electromagnetic field distribution along x, y, z axes; 2 – electric field strength, V/m;
- 3 – magnetic field strength, A/m; 4 – surface current, A/m; 5 – radiation energy of electric component, W/m³;
- 6 – radiation energy of magnetic component, W/m³

⁹ Басаков С. И. Электродинамика и распространение волн. М. : Наука ; Коломейцев В. А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Часть 2. Саратов : СГТУ, 2006. 233 с.

¹⁰ Курушин А. А., Пластикова А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio.

Обсуждение и заключение

В результате теоретических исследований получены зависимости электрофизических параметров хмеля от влажности и разработана конструкционно-технологическая схема хмелесушилки непрерывно-поточного действия с поярусно расположенными нетрадиционными резонаторами и с источниками энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

Предварительно обоснованные удельные энергетические затраты хмелесушилки при мощности СВЧ-генераторов 4,0 кВт (без учета мощности калорифера и вентилятора) для

сушки свежесобранного хмеля влажностью 76–82 % до влажности 11–14 % составляют 0,30–0,33 кВт·ч/кг.

Предварительные экспериментальные исследования показывают, что интенсивность влаговыделения из шишек хмеля при СВЧ-конвективном нагреве возрастает в 5–6 раз, по сравнению с конвективным способом сушки, при сохранении ценных для пивоварения качеств.

Внедрение микроволновой технологии сушки с применением конвективного способа испарения и удаления влаги из сушильной камеры позволяет сократить продолжительность процесса, сберечь ценные компоненты шишек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеха О. В. Анализ рынка производства и переработки хмеля в системе обеспечения продовольственной безопасности России // Вопросы региональной экономики. 2021. № 3. С. 95–101.
2. Исследование технологического процесса сушки хмеля в сушилке ПХБ-750 / А. О. Васильев [и др.] // Вестник Чувашской ГСХА. 2019. № 1 (8). С. 96–102. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39241139> (дата обращения: 02.10.2022).
3. Комплекс для первичной послеуборочной обработки хмеля : патент 2680709 Российская Федерация / Иванчиков Ю. В. [и др.]. № 2017144962 ; заявл. 20.12.2017 ; опубл. 25.02.2019. URL: https://i.moscow/patents/ru2680709c1_20190225 (дата обращения: 02.10.2022).
4. Хмелесушилка непрерывно-поточного действия с источниками эндогенно-конвективного нагрева : патент 2774186 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021121317 ; заявл. 19.07.2021 ; опубл. 16.06.2022. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2774186.html> (дата обращения: 02.10.2022).
5. Хмелесушилка с источниками эндогенно-конвективного нагрева / М. В. Просвирякова [и др.] // Вестник Чувашской сельскохозяйственной академии. 2021. № 2. С. 91–99. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46615198> (дата обращения: 02.10.2022).
6. Хмелесушилка с тороидальными и астроидальными резонаторами с энергоподводом в электромагнитном поле : патент 2772992 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021135280 ; заявл. 01.12.2021 ; опубл. 30.05.2022.
7. СВЧ-конвективная хмелесушилка непрерывно-поточного действия с полусферическим резонатором : патент 2770628 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021136688 ; заявл. 13.12.2021 ; опубл. 19.04.2022. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2770628.html> (дата обращения: 02.10.2022).
8. Многорезонаторная хмелесушилка с энергоподводом в электромагнитном поле : патент 2772987 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021132821 ; заявл. 11.11.2021 ; опубл. 30.05.2022.
9. Сивяков Б. К., Григорьян С. В. Математическое моделирование многоволновой СВЧ установки для сушки продуктов // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4. С. 5–11.
10. Казарцев Д. А. Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов //

Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83, № 3. С. 17–22. URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/2816> (дата обращения: 02.10.2022).

11. Анализ разработанных сверхвысокочастотных установок для термообработки сырья / Г. В. Новикова [и др.] // Вестник Казанского ГАУ. 2016. № 4. С. 89–93. URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/2816> (дата обращения: 02.10.2022).

12. Дробахин О. О., Салтыков Д. Ю. Исследование возможности применения связанных би-конических резонаторов для определения параметров диэлектрических материалов // Прикладная радиоэлектроника. 2014. Т. 13, № 1. С. 64–68.

13. Сверхвысокочастотная хмелесушилка с паярусно расположенными резонаторами (тюбинг) : патент 2774961 Российская Федерация / Просвирякова М. В. [и др.]. № 2021129382 ; заявл. 08.10.2021 ; опубл. 24.06.2022.

14. Буклагина Г. В. Интенсификация сушки зерна активным вентилированием с использованием электромагнитного поля СВЧ // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2009. № 2.

15. Совершенствование комбинированного способа сушки листьев табака на основе применения СВЧ-излучений / Л. П. Пестова [и др.] // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института табака, махорки и табачных изделий. 2019. № 182. С. 317–323.

Поступила 26.09.2022; одобрена после рецензирования 03.11.2022; принята к публикации 28.12.2022

Об авторах:

Просвирякова Марьяна Валентиновна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов им. академика И. Ф. Бородина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>, prosviryakova.maryana@yandex.ru

Сторчевой Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов им. академика И. Ф. Бородина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, energo-air@rgau-msha.ru

Горячева Наталья Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент Академии гражданского защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, ул. Соколовская, стр. 1А), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4874-3922>, goryacheva.76@mail.ru

Михайлова Ольга Валентиновна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>, ds17823@yandex.ru

Новикова Галина Владимировна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, novikovagalina@yandex.ru

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

Заявленный вклад авторов:

М. В. Просвирякова – общее руководство проектом, анализ существующих хмелесушилок, исследование электрофизических параметров сырья, построение графических зависимостей.

В. Ф. Сторчевой – инновационная идея ярусного расположения резонаторов в малогабаритной хмелесушилке для фермерских хозяйств, результаты обоснования динамики эндогенного нагрева шишек хмеля при разных напряжениях электрического поля в процессе изменения фактора диэлектрических потерь сырья.

Н. Г. Горячева – работа над текстом статьи, определение эффективных режимов сушки хмеля в каждом резонаторе.

О. В. Михайлова – построение 3D-модели хмелесушилки, исследование электродинамических параметров в программе CST Microwave Studio, SolidWorks.

Г. В. Новикова – формулирование цели, задачи исследования, обоснование конструкции хмелесушилки с оформлением заявки на изобретения.

А. В. Сторчевой – сбор и обработка материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Chekha O.V. [Analysis of Hop Production and Processing Market in the System of Food Security of Russia]. *Voprosy regionalnoy ekonomiki*. 2021;(3):95–101. (In Russ.)

2. Vasiliev A.O., Andreev R.V., Alexeev E.P., et al. Research into the Technological Process of Drying Hop in Pcb-750 Dryer. *Vestnik Chuvashskoy GSKhA*. 2019;(1):96–102. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39241139> (accessed 02.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

3. Ivanshchikov Yu.V., Makushev A.Ye., Dobrokhotov Yu.N., et al. [Complex for Primary Postharvest Processing of Hops]. Patent 2,680,709 Russian Federation. 2019 February 25. Available at: https://i.moscow/patents/ru2680709c1_20190225 (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

4. Mikhaylova O.V., Novikova G.V., Prosviryakova M.V., et al. [Continuous-Flow Hop Dryer with Endogenous Convective Heating Sources]. Patent 2,774,186 Russian Federation. 2022 June 16. Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2774186.html> (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

5. Prosviryakova M.V., Storchevov V.F., Goryacheva N.G., et al. Hop Dryer with Endogenous-Convective Heating Sources. *Vestnik Chuvashskoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2021;(2):91–99. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46615198> (accessed 02.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

6. Prosviryakova M.V., Storchevov V.F., Goryacheva N.G., et al. [Hop Dryer with Toroidal and As-troidal Resonators with Energy Supply in the Electromagnetic Field]. Patent 2,772,992. 2022 May 30. (In Russ.)

7. Mikhaylova O.V., Novikova G.V., Ziganshin B.G., et al. [Microwave Convective Continuous-Flow Hop Dryer with Hemispherical Resonator]. Patent 2,770,628 Russian Federation. 2022 April 19. Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2770628.html> (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

8. Prosviryakova M.V., Storchevov V.F., Goryacheva N.G., et al. [Multiresonator Hop Dryer with Energy Supply in Electromagnetic Field]. Patent 2,772,987 Russian Federation. 2022 May 30. (In Russ.)

9. Sivyakov B.K., Grigoryan S.V. [Mathematical Modeling of a Multi-Wave Microwave Drying Unit]. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2019;(4):5–11. (In Russ.)

10. Kazartsev D.A. Development of General Types of Mathematical Models for Drying Food Products with Microwave Energy Supply Based on the Laws of Chemical Kinetics of Heterogeneous Processes. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021;83(3):17–22. Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/2816> (accessed 02.10.2022). (In Russ.)

11. Novikova G.V., Zhdankin G.V., Mikhaylova O.V., Belov A.A. Analysis of Microwave Installations for Heat Treatment of Raw Materials. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2016;(4):89–93. Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/2816> (accessed 02.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

12. Drobakhin O.O., Saltykov D.Yu. [Study of the Possibility of Using Coupled Biconical Resonators to Determine the Parameters of Dielectric Materials]. *Prikladnaya radioelektronika*. 2014;13(1):64–68. (In Russ.)

13. Prosviryakova M.V., Storchevov V.F., Goryacheva N.G., et al. [Ultrahigh-Frequency Hop Dryer with tiered Resonators (Tubing)]. Patent 2,774,961 Russian Federation. 2022 June 24. (In Russ.)

14. Buklagina G.V. [Intensification of Grain Drying by Active Venting with the Use of Microwave Electromagnetic Field]. *Inzhenerno-tehnicheskoe obespechenie APK. Referativnyy zhurnal*. 2009;(2). (In Russ.)

15. Pestova L.P., Vinevskiy Ye.I., Chernov A.V., Ivanitskiy K.I. [Improvement of the Combined Drying Method of Tobacco Leaves Based on the Use of Microwave Radiation]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta tabaka, makhorki i tabachnykh izdeliy*. 2019;(182):317–323. (In Russ.)

Submitted 26.09.2022; revised 03.11.2022; accepted 28.12.2022

About the authors:

Maryana V. Prosviryakova, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the I.F. Borodin Chair of Automation and Robotization of Technological Processes, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>, prosviryakova.maryana@yandex.ru

Vladimir F. Storcheyov, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the I.F. Borodin Chair of Automation and Robotization of Technological Processes, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, energo-air@rgau-msha.ru

Natalya G. Goryacheva, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., 141435 Khimki, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4874-3922>, goryacheva.76@mail.ru

Olga V. Mikhaylova, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Professor of the Chair of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>, ds17823@yandex.ru

Galina V. Novikova, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Senior Scientist of Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, novikovagalina@yandex.ru

Aleksandr V. Storcheyov, Senior Lecturer of the Chair of Social and Humanitarian Studies, Moscow State University of Food Production (11 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, alecks.10@mail.ru

Authors contribution:

M. V. Prosviryakova – general project management, analysis of existing hop dryers, study of electro-physical parameters of raw materials, construction of graphic dependencies.

V. F. Storcheyov – innovative idea of tier arrangement of resonators in a small-sized hop dryer for farms, the results of justification of the dynamics of endogenous heating of hop cones at different electric field strengths in the process of changing the dielectric loss factor of raw materials.

N. G. Goryacheva – work on the text of the article, determining the effective modes of hop drying in each resonator.

O. V. Mikhaylova – construction of 3D model of hop dryer, study of electrodynamic parameters in the program CST Microwave Studio, SolidWorks.

G. V. Novikova – formulation of the goal, objectives of the research, justification of the hop dryer design with the registration of an application for an invention.

A. V. Storcheyov – collection and processing of materials.


All authors have read and approved the final manuscript.



Процессы адресной доставки энергии и тепломассопереноса в системах с нано-, микро- и макроэлементами

А. В. Гаврилов , Ю. Б. Гербер

Агротехнологическая академия КФУ имени В. И. Вернадского
(г. Симферополь, Российская Федерация)

 tehfac@mail.ru

Аннотация

Введение. Производство современных технологий должно учитывать всесторонний анализ энергетических, биотехнологических и теплофизических явлений. Основными в пищевых технологиях являются процессы тепло- и массообмена, которые необходимо интенсифицировать.

Цель статьи. Исследование механизмов и моделирование кинетики тепломассопереноса в микроволновом поле в технологиях комплексной переработки пищевого сырья. **Материалы и методы.** Комбинация тепловых, гидродинамических и диффузионных движущих сил при их согласованном действии способна решать проблемные вопросы обработки сырья, в первую очередь пищевого. С помощью принципов теории подобия предлагается безразмерный комплекс – число энергетического действия, которое отражает влияние электромагнитного поля. Предложена классификация режимов потока из микро- и нанокапиллярной структуры.

Результаты исследования. Непосредственный, адресный, подвод энергии к жидкой фазе сырья дает возможности получения в аппарате твердой фазы. Это принципиально новые возможности процесса обезвоживания. Скорости выпаривания при постоянной мощности поля зависят только от типа растворителя. В результате обработки всех точек эксперимента было получено критериальное уравнение, которое устанавливает зависимость числа энергетического действия от безразмерного давления и безразмерной теплоты фазового перехода.

Обсуждение и заключение. Разработан новый класс тепломассообменного оборудования – электродинамические аппараты. Предложенные экспериментальные результаты предполагают, что при организации процессов адресной доставки энергии с привлечением импульсного микроволнового поля поток из капилляров и нанокапилляров инициируется гораздо быстрее. Важное преимущество электродинамических экстракторов – возможность получения полиэкстрактов. Пищевые технологии с организацией процессов адресной доставки энергии при выпарке, сушке и экстрагировании являются ресурсо- и энергоэффективными и обеспечивают полное сохранение потенциала сырья.

Ключевые слова: энергоемкость, теплообмен, массообмен, интенсификация, тепломассоперенос, микроволновое поле, адресная доставка энергии, диффузия, микрокапиллярная структура, нанокапиллярная структура, процесс обезвоживания, выпаривание

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б., 2023



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


Для цитирования: Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Процессы адресной доставки энергии и тепломассопереноса в системах с нано-, микро- и макроэлементами // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 128–139. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.128-139>

Original article

Targeted Energy Delivery and Heat-Mass Transfer Processes in Systems with Nano-, Micro-, and Macroelements

A. V. Gavrilov , Yu. B. Gerber

Agrotechnological Academy of the V. I. Vernadsky
Crimean Federal University (Simferopol, Russian Federation)

 tehfac@mail.ru

Abstract

Introduction. The production of modern technologies should take into account a comprehensive analysis of energy, biotechnological and thermophysical phenomena. The main processes in food technologies are the processes of heat and mass transfer, which need to be intensified.

Aim of the Article. The aim of the work is studying the mechanisms and modeling the kinetics of heat and mass transfer in the microwave field in the technologies for complex processing of food raw materials.

Materials and Methods. The combination of thermal, hydrodynamic and diffusion driving forces with their coordinated action is able to solve problematic issues of processing raw materials, primarily food. Using the principles of the similarity theory, there is proposed a dimensionless complex – the number of energy action, which reflects the influence of the electromagnetic field.

Results. Direct, targeted energy supply to the liquid phase of raw materials makes it possible to obtain a solid phase in the apparatus. These are fundamentally new features for the dehydration process. Boil-off rates at constant electromagnetic field intensity depend only on the solvent type. As a result of processing all experimental points, a criterion equation was obtained, it establishes the dependence of the energy action number on the dimensionless pressure and the dimensionless heat of the phase transition.

Discussion and Conclusion. There are developed a new class of heat and mass exchange equipment – electrodynamic apparatuses. The experimental results suggest that the flow from capillaries and nano-capillaries is initiated much faster when organizing the processes of targeted energy delivery with the involvement of pulsed microwave field. An important advantage of electrodynamic extractors is the possibility of obtaining poly-extracts. Food technologies with targeted energy delivery during evaporating, drying and extracting are resource- and energy-efficient and ensure full preservation of raw material potential.

Keywords: energy intensity, heat exchange, mass transfer, intensification, heat and mass transfer, microwave field, targeted energy delivery, diffusion, microcapillary structure, nanocapillary structure, dehydration process, evaporation

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

For citation: Gavrilov A.V., Gerber Yu.B. Targeted Energy Delivery and Heat-Mass Transfer Processes in Systems with Nano-, Micro-, and Macroelements. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):128–139. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.128-139>

Введение

Производство пищевых продуктов питания в странах с развитой экономикой характеризуется показателем энергоёмкости¹. Выбросы и отходы от производства продуктов питания загрязняют атмосферу и окружающую среду. В то же время технологии производства пищевых продуктов значительно отстают в практической реализации проектов инновации от других секторов экономики [1; 2]. При этом проблемы пищевых энергетических технологий в мире комплексно не решаются.

Сырьё для производства пищевых продуктов специфичное. Состоит из макро- и микроэлементов и элементов наноразмерного типа. Более того, пищевые технологии нацелены именно на объекты микро- и наноразмерного типа. Эти объекты обладают большим диффузионным сопротивлением и определяют энергоёмкость технологии, соотношение использованного сырья, а также сохранение пищевого потенциала. В связи с этим в отходах остается до 15–20 % целевых компонентов, которые находятся в микро- и нанокapиллярах и не извлекаются традиционными технологиями. Использование новых технологий в пищевой перерабатывающей промышленности даст возможность создавать новые продукты, принципиально отличающиеся от известных аналогов. Производство современных технологий должно учитывать всесторонний анализ энергетических, биотехнологических и теплофизических явлений. Основными процессами в пищевых технологиях являются процессы тепло- и массообмена, которые необходимо интенсифицировать. Эти процессы охватывают энергетику и качество пищевого готового продукта.

Цель исследования – анализ механизмов и моделирование кинетики тепломассопереноса в микроволновом поле (МВ-поле) в технологиях комплексной переработки пищевого сырья.

Обзор литературы

Этап развития общества неразрывно связан с ростом потребления энергоресурсов и снижением их запасов². В таких условиях возрастает роль экономически полезного расхода энергии, повышения энергетического коэффициента полезного действия инновационных технологий. В пищевых технологиях (ПТ) больше всего расходуется энергетических ресурсов, в основном в пищевом производстве происходит термическая обработка сырья [3]. А эффективность использования энергетических ресурсов и сырья остается на низком уровне [4; 5]. Если сравнить количество энергии, получаемое человеком с пищей, с затратам на ее производство, то получим энергетический КПД, который не превысит 10 % [6].

При снижении количества потребляемой энергии наблюдается повышение энергетического КПД ПТ, снижение себестоимости готового продукта и степени термического воздействия на него, а также сохранение термолабильных и биологически активных компонентов сырья.

Для ПТ характерны научные и технические противоречия. Известен факт, что при повышении температуры интенсифицируются процессы тепломассопереноса, но также происходит снижение пищевой ценности продукта вследствие разрушения функциональных компонентов сырья [7–9]. Известные технологии не позволяют разрешить эти противоречия.

Важным фактором ПТ является экологическая безопасность производства

¹ Gabor D., Colombo U., King A. S. Beyond The Age of Waste: a Report to the Club of Rome. Elsevier, 2016. 258 p. URL: Available at: <https://www.elsevier.com/books/beyond-the-age-of-waste/gabor/978-0-08-027303-7> (дата обращения: 27.09.2022); Рынок нано: от нанотехнологий к нанопродуктам / Г. Л. Азоев [и др.]. М. : БИНОМ, 2011. 319 с.

² Gabor D., Colombo U., King A. S. Beyond The Age of Waste...

продукта. При производстве в отходах ПТ содержится большое количество нужных компонентов, экономическая ценность которых в разы больше стоимости готового продукта. Традиционные технологии не позволяют их извлекать, потому что они находятся внутри клеток (размеры оболочек от 7 до 30 нм), в капиллярах сырья (размер от 5 нм).

Чтобы отходы пищевых технологий являлись полноценными источниками пищи, нужно разрабатывать инновационные и экономически эффективные принципы организации процессов ПТ. Предлагается процессы стерилизации, экстрагирования, биотехнологий, сушки, сокоотдачи и прочие осуществлять с помощью технологий адресной доставки энергии (АДЭ). Осуществляемые принципы при переводе пищевого производства на технологии АДЭ позволят в разы снизить энергоемкость, степень воздействия температур на пищевое сырье и готовый продукт, а также получить новые продукты, принципиально отличающиеся от аналогов.

Многие ученые занимаются поиском инновационных средств обработки пищевого сырья. К таким средствам относятся электрические и электромагнитные интенсификаторы. Наиболее мощными и энергоэффективными являются микроволновые (МВ) генераторы [10–12]. Инновационные технологии применения МВ-поля известны в мире и активно исследуются при выпаривании продуктов [13–15]. В Китае создана сушильная установка с МВ-подводом энергии для производства яблочных чипсов [16–18]. В Аргентине получены образцы сушеного картофеля и сушеной моркови в условиях МВ-поля при атмосферном давлении, при t до 30 °С в вакууме до 3 кПа [19–21]. В Турции проводились исследования процессов экстрагирования фенолов из черники в состоянии порошка 60-процентным водным раствором этанола [22–24]. По

результатам исследований получили 87-процентный экстракт.

Результаты этих исследований доказывают перспективность новых средств обработки пищевого сырья. Следует ожидать повышение показателей конечных концентраций при выпарке, снижение t обработки продукта, уменьшение экономических и энергетических затрат.

В статье определены задачи решения перечисленных проблем. Научная гипотеза работы – реализация эффекта адресной доставки энергии к необходимым элементам сырья при взаимодействии с электромагнитным полем [25–27].

Материалы и методы

Принятую классификацию процессов на механические, гидродинамические, тепловые и массообменные предлагается дополнить гибридными процессами, результат которых определяется последовательным действием нескольких движущих сил. Комбинация тепловых, гидродинамических и диффузионных движущих сил при их согласованном действии способна решать проблемные вопросы обработки сырья, в первую очередь пищевого. На основе предложенной концепции формулируются гипотезы (табл. 1).

Рассмотрим процесс тепломассопереноса с позиций классического уравнения Фика:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial C}{\partial x} w_x. \quad (1)$$

Первое слагаемое в (1) – это вялый процесс, воздействовать на который в условиях микро- и наномасштабных структур не удастся. Ставится задача активизировать возможности второго слагаемого и организовать транспорт компонентов из капилляров за счет гидродинамической движущей силы, увеличить скорость потока w_x . Эта движущая сила определяется разностью давлений внутри капилляра и в среде.

Энергетические и технологические противоречия пищевых производств
Energy and technological contradictions in food production

№	Задача / Task	Традиционные решения / Traditional solutions	Гипотезы / Hypotheses
1	Выпаривание растворов / Evaporation of solutions	Энергия подводится непосредственно к раствору теплопередачей / The energy is brought directly to the solution by heat transfer	Возможности АДЭ непосредственно к растворителю / Possibilities of targeted energy delivery directly to the solvent
2	Сушка сырья/ Raw material drying	Энергия направляется к промежуточному потоку, который в свою очередь трансформирует влагу в пар / The energy is directed to the intermediate stream, which in turn transforms the moisture into steam	Возможности АДЭ непосредственно к влаге в объеме продукта / Possibilities of targeted energy delivery directly to the moisture in the product volume
3	Сушка сырья / Raw material drying	Удаляемая влага из продукта переходит в паровую фазу / Moisture removed from the product passes into the vapor phase	Возможности удаления влаги в виде двухфазного потока / Moisture removal capabilities in the form of two-phase flow
4	Извлечение целевых компонентов / Extraction of target components	Растворение компонента с помощью экстрагента и с помощью процесса диффузии в экстракт / Dissolution of a component using an extractant and using a diffusion process into the extract	Возможности перехода целевых компонентов из межклеточного пространства, а также из клеток нерастворимых компонентов / Possibilities of transferring target components from intercellular space as well as from cells of insoluble components

Примечание: таблица составлена по материалам статьи О. Г. Бурдо [28]

Note: Table was compiled based on the materials of the article by O. G. Burdo

Но классическое уравнение гидравлики дополняется гидравлическим сопротивлением микроканала (диаметр d), вызванным силами поверхностного сопротивления σ :

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[\frac{\lambda \cdot l}{d} + \sum \xi \right] + \rho \cdot g l + \frac{\sigma}{d}. \quad (2)$$

Запустить процесс транспортировки содержимого капилляров предложено с помощью электромагнитных источников энергии. Их влияние в уравнении энергии отражается как действие внутренних распределенных источников, мощность которых N в объеме V :

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N \eta}{V_1 c_{1V} \rho_1}. \quad (3)$$

Индекс (1) в соотношении (3) относится к раствору в капилляре. Энергия поля избирательно поглощается полярными молекулами раствора. Максимальная температура окажется в глубине капилляра, там, где термическое сопротивление к среде максимально. Такое точечное повышение температуры приведет к локальному образованию паровой фазы, резкому росту давления в глубине капилляра, инициирует гибридный поток, который и выбрасывает содержимое через открытый торец в среду. Это явление назовем механодиффузией³ [29–31].

О. Г. Бурдо и соавторы отмечают: в связи с тем, что процесс АДЭ осуществляется гидродинамической движущей силой, которая во много раз больше традиционного диффузионного потока, возникает трудность определить влияние данного потока в традиционных уравнениях массопереноса. С помощью

³ Gremenok V. F. Thin Film Solar Cells Based on Cu (In, Ga) Se₂ // ECOBALTICA № 2008: Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum. 2006. P. 24–28.

принципов теории подобия предлагается безразмерный комплекс – число энергетического действия B_u [28], которое отражает влияние электромагнитного поля. Число B_u отражает зависимость расходов энергии предлагаемой технологии Q и традиционной технологии: $B_u = Q / Q_o$. Для рассматриваемых процессов с помощью методов теории подобия установлены структуры моделей с обобщенными переменными и соотношения для расчета числа B_u (табл. 2) [28].

Механизмы транспортных процессов в микро- и нанокapиллярах

Предложена классификация режимов потока из микро- и нанокapиллярной структуры (рис. 1). Во-первых, это ламинарная бародиффузия, которая интенсифицирует внутридиффузионный массоперенос. Влага подается из объема сырья на поверхность фазового контакта и традиционным диффузионным потоком (диффузионное сопротивление в стесненных условиях капилляра R_c), но также

бародиффузионным потоком (гидравлическое сопротивление R_b). Во-вторых, это турбулентная бародиффузия, которая интенсифицирует и внутри- и внешнедиффузионный массоперенос. В среду выносятся 2 потока: традиционный J_d и гидродинамический J_b . В-третьих, это специфичный гибридный поток, который переносит и растворимые, и нерастворимые экстрагентом компоненты («механодиффузия» [21]).

Результаты исследования

Гипотеза доказана экспериментально. Исследования проводились на модели сырья (рис. 2). Капилляр заполняли водой, которая подкрашивалась чернилами. В оболочке сырья содержалось 3 капилляра. Модель сырья (оболочка с капиллярами) располагалась в термостате и в камере с МВ-генератором (рис. 2). Схема установки и результаты процесса бародиффузии показаны на рисунке 2.

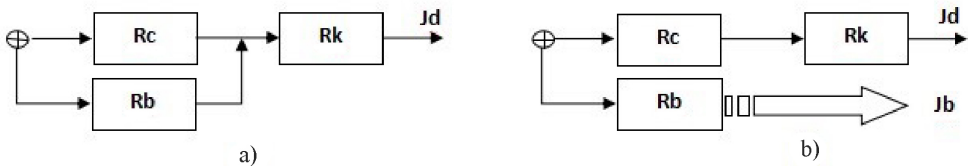
Анализ результатов представлен в таблице 3.

Т а б л и ц а 2
Table 2

**Расчетные модели
Calculation models**

Процесс / Process	Число B_u / Number of B_u	Модель процесса / Process model
Активация и инактивация микроорганизмов / Activation and inactivation of microorganisms	$B_u = N(\zeta V C p \Delta t \rho)^{-1}$	$F_o = A R e^n P r^m B u^k$
Экстрагирование / Extracting	$B_u = N(r w d^2 \rho)^{-1}$	$S_h = A R e^n S c^m B u^k$
Сушка / Drying	$B_u = N(r V \rho)^{-1}$	$S_h = A R e^n S c^m P e^p B u^k$
Выпаривание / Evaporation	$B_u = N(r V \rho)^{-1}$	$B_u = A R^n P^q$

В соотношениях принято: N – мощности излучения; V – объемный расход удаляемой влаги; r – скрытая теплота фазового перехода; d – определяющий размер; ρ – плотность / The ratios assume: N – radiation power; V – volume flow rate of moisture removed; r – latent heat of phase transition; d – defining dimension; ρ – density



Р и с. 1. Схемы транспортных процессов при бародиффузии: а) ламинарная; б) турбулентная
F i g. 1. Schemes of transport processes during barodiffusion: a) laminar; b) turbulent



Р и с. 2. Модель сырья в МВ-камере
 F i g. 2. Model of raw materials in the MV-chamber

Т а б л и ц а 3
 T a b l e 3

Результаты визуального исследования
Results of visual studies

№	Стенд / Stand	Время, с / Time, s	Температура, °С / Temperature, °C	Характеристики процесса / Process features
1	Термостат / Thermostat	7 200	90	Из капилляров испарилось около 1 % воды. Чернила не выходили / About 1% of the water evaporated from the capillaries. The ink did not come out
		16	66	Наблюдалось вытекание подкрашенной жидкости из капилляра 1, появление пузырьков пара в капиллярах 2 и 3 / Dyed liquid leaked from capillary 1, vapor bubbles appeared in capillaries 2 and 3
2	МВ-камера / MV-camera	36	66	Капилляр 1 оказался пустым / Capillary 1 was empty
		56	66	Наблюдалось вытекание подкрашенной жидкости из капилляров 2 и 3 / Dyed liquid was observed leaking from capillaries 2 and 3
		74	66	Все капилляры оказались пустыми / Все капилляры оказались пустыми

Стендовые испытания микроволнового вакуум-выпарного аппарата

Проведение процесса выпаривания при ГУ 2 рода (в отличии от 1 и 3 рода в традиционных аппаратах) предопределяет преимущества: возможность получения высококонцентрированных растворов. В инновационных аппаратах нет классической теплопередачи, нет проблемы пограничного слоя. Непосредственный, адресный, подвод энергии

к жидкой фазе сырья дает возможность получения в аппарате твердой фазы. Это принципиально новые возможности процесса обезвоживания. Скорости выпаривания при постоянной мощности поля зависят только от типа растворителя.

Определено, что скорость влагоизвлечения в спиртосодержащих системах в 2,0–2,5 раза выше, чем в водорастворимых, а в растворах на основе ацетона – в 5 раз. Давление в системе

не превышало 10 кПа, что обеспечило процесс выпаривания при относительно низкой температуре 20–45 °С. Конечная концентрация сухих веществ дошла до 80–95 %*w*_г, это выше на 20–25 %, по сравнению с известными установками.

В качестве базовых значений принято: давление $P_o = 10$ кПа; теплота фазового перехода $R_o = 525$ кДж/кг.

Обсуждение и заключение

В статье с помощью видеосъемки доказан факт существования гидродинамического потока из каналов капилляров сырья.

Подтверждена гипотеза, сформулированная выше, что центры парообразования образуются в глубине капилляров. Установлено, что первоначально образуются центры парообразования в каналах капилляров, расположенных близко к генератору энергии.

Установлено, что процессом образования бародиффузионного потока, а также его мощностью возможно управлять. Факторами для управления процессом являются мощность и направленное электромагнитное излучение, при условии их согласования со структурой сырья и диаметрами капилляров.

Также видеосъемка доказывает, что характер потока отличается от классической бародиффузии. Большая концентрация электромагнитной энергии в точке объема капилляра практически приводит к фазовому переходу, ускоренному росту объема пара и моментальному видоизменению гидродинамической ситуации в капилляре. В результате происходит резкий выброс содержимого капилляра

и, следовательно, разрыв клеточной оболочки с выбросом содержимого клетки.

Для наноиндустрии созданы образцы техники, которые реализуют эффект «механодиффузии». Разработан новый класс теплообменного оборудования – электродинамические аппараты. Получены совершенно новые результаты по интенсификации теплообмена. Предложенные экспериментальные результаты предполагают, что при организации процессов адресной доставки энергии с привлечением импульсного МВ-поля поток из капилляров и нанокапилляров инициируется гораздо быстрее. Важное преимущество электродинамических экстракторов – возможность получения полиэкстрактов.

Проведение процесса выпаривания при ГУ 2 рода (в отличие от 1 и 3 рода в традиционных аппаратах) предопределяет преимущества: возможность получения высококонцентрированных растворов. В инновационных аппаратах нет классической теплопередачи, нет проблемы пограничного слоя. Непосредственный, адресный, подвод энергии к жидкой фазе сырья дает возможность получения в аппарате твердой фазы. Это принципиально новые возможности процесса обезвоживания. Скорости выпаривания при постоянной мощности поля зависят только от типа растворителя.

Пищевые технологии с организацией процессов адресной доставки энергии при выпарке, сушке и экстрагировании являются ресурсо- и энергоэффективными и обеспечивают полное сохранение потенциала сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nanobiotechnology Approaches for Engineering Smart Plant Sensors / J. P. Giraldo [et al.] // Nature Nanotechnology. 2019. Vol. 14, Issue 6. P. 541–553. doi: <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0470-6>
2. Rawal M., Singh A., Amiji M. M. Quality-by-Design Concepts to Improve Nanotechnology-Based Drug Development // Pharmaceutical Research. 2019. Vol. 36, Issue 11. doi: <https://doi.org/10.1007/s11095-019-2692-6>

3. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus—Opportunities for Water Resources Research / X. Cai [et al.] // *Advances in Water Resources*. 2018. Vol. 111. P. 259–273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
4. Clapp J., Newell P., Brent Z. W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems // *The Journal of Peasant Studies*. 2018. Vol. 45, Issue 1. P. 80–88. doi: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
5. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: a Conceptual Framework // *International Journal of Production Economics*. 2018. Vol. 195. P. 419–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>
6. Hosovskyi R. Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks // *Chemistry & Chemical Technology*. 2016. Vol. 10, Issue 4. P. 459–464. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht10.04.459>
7. Sabarez H. T. Thermal Drying of Foods // *Fruit Preservation*. Food Engineering Series ; A. Rosenthal, R. Deliza, J. Welti-Chanes, G. Barbosa-Cánovas (eds). New York : Springer, 2018. P. 181–210. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7
8. Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques / C. H. Chong [et al.] // *Food Bioprocess Technol*. 2014. Vol. 7, Issue 4. P. 975–989. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1123-7>
9. Kumar C., Karim M. A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 379–394. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
10. Microwave Vacuum Drying and Multi-Flash Drying of Pumpkin Slices / R. L. Monteiro [et al.] // *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015>
11. Multi-Scale Model of Food Drying: Current Status and Challenges / M. M. Rahman [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58, Issue 5. P. 858–876. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299>
12. Bozkir H., Baysal T. Concentration of Apple Juice Using a Vacuum Microwave Evaporator as a Novel Technique: Determination of Quality Characteristics // *Journal of Food Process Engineering*. 2017. Vol. 40, Issue 5. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12535>
13. Kumar A., Shrivastava S. L. Temperature, Concentration, and Frequency Dependent Dielectric Properties of Pineapple Juice Relevant to Its Concentration by Microwave Energy // *Journal of Food Process Engineering*. 2019. Vol. 42, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13013>
14. Influence of Three Different Concentration Techniques on Evaporation Rate, Color and Phenolics Content of Blueberry Juice / A. Elik [et al.] // *Journal of Food Science and Technology*. 2016. Vol. 53, Issue 5. P. 2389–2395. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2213-0>
15. Drying Characteristics and Modeling of Apple Slices during Microwave Intermittent Drying / J.-W. Dai [et al.] // *Journal of Food Process Engineering*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13212>
16. Arballo J. R., Campañone L. A., Mascheroni R. H. Study of Microwave Drying of Vegetables by Numerical Modeling. Influence of Dielectric Properties and Operating Conditions // *Food Science and Technology Research*. 2018. Vol. 24, Issue 5. P. 811–816. doi: <https://doi.org/10.3136/fstr.24.811>
17. Elik A., Yanik D. K., Göğüş F. Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolics from Blueberry // *Romanian Biotechnological Letters*. 2019. Vol. 24, Issue 1. P. 30–40. doi: <https://doi.org/10.25083/rbl/24.1/30.40>
18. Burdo O. G., Bandura V. N., Levtrinskaya Y. O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54, Issue 2. P. 210–218. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375518020047>
19. Microwave Energy, as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polydisperse Extract Formation / O. G. Burdo [et al.] // *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. Vol. 1, Issue 36. P. 58–71. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1217259>
20. Burdo O. G. Nanoscale Effects in Food-Production Technologies // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005. Vol. 78, Issue 1. P. 90–96. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-005-0033-6>
21. Технологии селективного подвода энергии при выпаривании пищевых растворов / О. Г. Бурдо [и др.] // *Проблемы региональной энергетики*. 2017. № 1. С. 100–109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29043965> (дата обращения: 27.09.2022).

22. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes / O. Burdo [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, Issue 11. P. 34–42.
23. Гаврилов А. В. Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2018. Вып. 16. С. 82–89. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36774234> (дата обращения: 27.09.2022).
24. Studying the Operation of Innovative Equipment for Thermomechanical Treatment and Dehydration of Food Raw Materials / O. Burdo [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. P. 24–32. URL: https://www.researchgate.net/publication/337229212_Studying_the_operation_of_innovative_equipment_for_thermomechanical_treatment_and_dehydration_of_food_raw_materials (дата обращения: 27.09.2022).
25. Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing / O. G. Burdo [et al.] // Problemele Energeticii Regionale. 2019. Vol. 2, Issue 43. P. 23–38. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
26. Гаврилов А. В. Анализ современных энерготехнологий переработки растительного сырья // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. 2019. № 5. С. 31–39. doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>
27. Development of Power-Efficient and Environmentally Safe Coffee Product Technologies / O. Burdo [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 11, Issue 103. P. 6–14. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/b42c/578cef37a69eccc671825a5e20d950ec14f1.pdf> (дата обращения: 27.09.2022).
28. Технологии адресной доставки энергии и термотрансформации при производстве продуктов питания / О. Г. Бурдо [и др.] // Проблемы региональной энергетики. 2016. Вып. 2. С. 55–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26638640> (дата обращения: 27.09.2022).
29. Гаврилов А. В. Экспериментальное моделирование процессов выпаривания водных растворов в условиях вакуума и микроволнового поля // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. 2020. Вып. 1. С. 41–50. doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2020-1-41-50>
30. Determination of Basic Parameters of Solarpanels / К. Тепе [et al.] // Международный научный журнал: Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 2. С. 22–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14671143> (дата обращения: 27.09.2022).
31. Prosekov A. Y., Ivanova S. A. Food Security: The Challenge of the Present // Geoforum. 2018. Vol. 91. P. 73–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>

Поступила 01.11.2022; одобрена после рецензирования 11.12.2022; принята к публикации 28.12.2022

Об авторах:

Гаврилов Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии КФУ имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, пос. Аграрное), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: [AАН-5137-2019](https://orcid.org/0000-0003-3382-0307), tehfac@mail.ru

Гербер Юрий Борисович, доктор технических наук, заместитель директора, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии КФУ имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, пос. Аграрное), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: [B-6690-2019](https://orcid.org/0000-0003-3224-6833), gerber_1961@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. В. Гаврилов – общая идея, обоснование цели и задач проведения эксперимента, проведение исследований.

Ю. Б. Гербер – техническое обеспечение проведения экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Giraldo J.P., Wu H., Newkirk G.M., et al. Nanobiotechnology Approaches for Engineering Smart Plant Sensors. *Nature Nanotechnology*. 2019;14(6):541–553. doi: <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0470-6>
Electrical technologies and equipment

2. Rawal M., Singh A., Amiji M.M. Quality-by-Design Concepts to Improve Nanotechnology-Based Drug Development. *Pharmaceutical Research*. 2019;36(11). doi: <https://doi.org/10.1007/s11095-019-2692-6>
3. Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., Marston L. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus—Opportunities for Water Resources Research. *Advances in Water Resources*. 2018;111:259–273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
4. Clapp J., Newell P., Brent Z.W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems. *The Journal of Peasant Studies*. 2018;45(1):80–88. doi: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
5. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: a Conceptual Framework. *International Journal of Production Economics*. 2018;195:419–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>
6. Hosovskyi R. Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks. *Chemistry & Chemical Technology*. 2016;10(4):459–464. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht.10.04.459>
7. Sabarez H.T. Thermal Drying of Foods. In: Rosenthal A., Deliza R., Welti-Chanes J., Barbosa-Cánovas G. (eds). *Fruit Preservation*. Food Engineering Series. New York: Springer. 2018. p. 181–210. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7
8. Chong C.H., Figie A., Law C.L., Wojdyło A. Combined Drying of Apple Cubes by Using of Heat Pump, Vacuum-Microwave, and Intermittent Techniques. *Food Bioprocess Technol.* 2014;7(4):975–989. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1123-7>
9. Kumar C., Karim M.A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 379–394. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
10. Monteiro R.L., Link J.V., Tribuzi G., et al. Microwave Vacuum Drying and Multi-Flash Drying of Pumpkin Slices. *Journal of Food Engineering*. 2018;232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015>
11. Rahman M.M., Joardder M.U.H., Khan M.I.H., et al. Multi-Scale Model of Food Drying: Current Status and Challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018;58(5):858–876. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299>
12. Bozkir H., Baysal T. Concentration of Apple Juice Using a Vacuum Microwave Evaporator as a Novel Technique: Determination of Quality Characteristics. *Journal of Food Process Engineering*. 2017;40(5). doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12535>
13. Kumar A., Shrivastava S.L. Temperature, Concentration, and Frequency Dependent Dielectric Properties of Pineapple Juice Relevant to Its Concentration by Microwave Energy. *Journal of Food Process Engineering*. 2019;42(1). doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13013>
14. Elik A., Yanik D.K., Maskan M., Göğüş F. Influence of Three Different Concentration Techniques on Evaporation Rate, Color and Phenolics Content of Blueberry Juice. *Journal of Food Science and Technology*. 2016;53(5):2389–2395. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2213-0>
15. Dai J.-W., Xiao H.-W., Zhang L.-H., et al. Drying Characteristics and Modeling of Apple Slices during Microwave Intermittent Drying. *Journal of Food Process Engineering*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13212>
16. Arballo J.R., Campañone L.A., Mascheroni R.H. Study of Microwave Drying of Vegetables by Numerical Modeling. Influence of Dielectric Properties and Operating Conditions. *Food Science and Technology Research*. 2018;24(5):811–816. doi: <https://doi.org/10.3136/fstr.24.811>
17. Elik A., Yanik D.K., Göğüş F. Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolics from Blueberry. *Romanian Biotechnological Letters*. 2019;24(1):30–40. doi: <https://doi.org/10.25083/rbl/24.1/30.40>
18. Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018;54(2):210–218. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375518020047>
19. Burdo O.G., Syrotuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. Microwave Energy, as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polydisperse Extract Formation. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018;1(36):58–71. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1217259>
20. Burdo O.G. Nanoscale Effects in Food-Production Technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005;78(1):90–96. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-005-0033-6>

21. Burdo O.G., Burdo A.K., Sirotiyuk I.V., Pur D.S. [Technologies of Selective Energy Input in Evaporation of Food Solutions]. *Problems of the Regional Energetics*. 2017;(1):100–109. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29043965> (accessed 27.09.2022). (In Russ.)
22. Burdo O., et al. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;4(11):34–42.
23. Gavrilov A.V. Researching of Process Energy Technologies Development of Vegetative Raw Materials. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2018;16:82–89. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36774234> (accessed 27.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Burdo O., Bezbakh I., Zykov A., Kepin N. Studying the Operation of Innovative Equipment for Thermomechanical Treatment and Dehydration of Food Raw Materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. p. 24–32. Available at: https://www.researchgate.net/publication/337229212_Studying_the_operation_of_innovative_equipment_for_thermomechanical_treatment_and_dehydration_of_food_raw_materials (accessed 27.09.2022).
25. Burdo O.G., Gavrilov A.V., Kashkano M.V., et al. Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing. *Problemele Energeticii Regionale*. 2019;2(43):23–38. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
26. Gavrilov A.V. Energy Sources in Innovative Energy Technologies of Vegetable Processing. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenerenogo universiteta im. V. P. Goryachkina*. 2019;(5):31–39. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>
27. Burdo O., Bezbah I., Zykov A., et al. Development of Power-Efficient and Environmentally Safe Coffee Product Technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020;11(103):6–14. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/b42c/578cef37a69eccc671825a5e20d950ec14f1.pdf> (accessed 27.09.2022).
28. Burdo O.G., Shit M.L., Zykov A.V., et al. [Targeted Energy Delivery and Thermo-Transformation Technologies in Food Production]. *Problems of the Regional Energetics*. 2016;2:55–68. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26638640> (accessed 27.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
29. Gavrilov A.V. Experimental Modeling of the Vaporization of Liquid Solutions under Vacuum and Microwave Field Conditions. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenerenogo universiteta im. V. P. Goryachkina*. 2020;(1):41–50. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2020-1-41-50>
30. Tepe K., Agbenotowossi K., Djeteli G., et al. Determination of Basic Parameters of Solarpanels. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal: Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2010;(2):22–27. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14671143> (accessed 27.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
31. Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food Security: The Challenge of the Present. *Geoforum*. 2018;91:73–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>

Submitted 01.11.2022; revised 11.12.2022; accepted 28.12.2022

About the authors:

Aleksandr V. Gavrilov, Cand.Sci (Engr.), Associate Professor of the Chair of Technology and Equipment for Producing and Processing of Livestock Products, Agrotechnological Academy of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: AAH-5137-2019, tehfac@mail.ru

Yuriy B. Gerber, Dr.Sci. (Engr.), Deputy Director, Head of the Chair of Technology and Equipment for Producing and Processing Livestock Products, Agrotechnological Academy of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Gavrilov – general idea, justification of the purpose and objectives of the experiment, conducting research.

Yu. B. Gerber – technical support for conducting experiments.

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 – *А. Д. Карпов*
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 15.03.2023 г. Дата выхода в свет 31.03.2023 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 11,7.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 244. 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 *A. D. Karpov*
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 15.03.2023. Date of publishing 31.03.2023.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 11.7.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 244. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)