

doi: 10.15507/2658-4123.033.202303

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

Том 33, № 3. 2023

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

16+



Vol. 33, no. 3. 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. Огарева»

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).

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. Огарева», 2023

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки)

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

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

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian 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 Петр Васильевич – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», 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. Огарева», ORCID: 0000-0003-2429-6777, levtzevar@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 – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», ORCID: 0000-0003-3224-6833 (Симферополь, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

Кухарев Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор, ректор 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. Огарева» (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. Огарева», 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

Дорохов А. С., Пономарев А. Г., Зернов В. Н., Петухов С. Н., Аксенов А. Г., Сибирев А. В. Результаты исследований усовершенствованной сошниковой группы посадочной машины	302
Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Уланов А. С., Безруков А. В., Комолов А. Д., Антипов Ю. А. Экспериментальные исследования высевающего аппарата зерновой сеялки СУБМ-3,6	321
Симонов М. В., Плотников С. А., Мокиев В. Ю. Теоретическое обоснование основных параметров аксиальных устройств для вытирания семян трав	339

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Казакевич П. П., Юрин А. Н. Разработка графического интерфейса приложения для системы технического зрения линии сортировки плодов	356
--	-----

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Ионов П. А., Сенин П. В., Земсков А. М., Пьянзов С. В., Салмин В. В. Влияние марок гидравлических масел на полноту и точность диагностирования гидроагрегатов российского и зарубежного производства	373
Мифтахов Э. Н., Мустафина С. И., Морозкин Н. Д., Насыров И. Ш., Мустафина С. А. Оценка эффективности влияния трубчатого турбулентного аппарата на кинетику процессов получения полимеров	388
Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров	403

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Исследование влияния режимных параметров ленточной ИК-сушилки на кинетику процесса сушки моркови	417
Долгих П. П., Трепуз С. В., Ханипова В. А., Сенкевич О. В. Результаты фотобиологических исследований по выращиванию салата под разнеспектральными источниками излучения	435
<i>Информация для авторов и читателей</i>	452

CONTENTS

AGRICULTURAL ENGINEERING

Dorokhov A. S., Ponomarev A. G., Zernov V. N., Petukhov S. N., Aksenov A. G., Sibirev A. V. Research Results of the Improved Coulter Group of the Planter	302
Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Ulanov A. S., Bezrukov A. V., Komolov A. D., Antipov Yu. A. Experimental Studies of the Seed-Sowing Device for the Grain Seeder SUBM-3.6	321
Simonov M. V., Plotnikov S. A., Mokiev V. Yu. Theoretical Substantiation of the Main Parameters of Axial Devices for Threshing Grass Seeds	339

FOOD SYSTEMS

Kazakevich P. P., Yurin A. N. Development of a Graphic Interface Application for the Vision System of the Fruit Sorting Line	356
---	-----

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Ionov P. A., Senin P. V., Zemskov A. M., Pyanzov S. V., Salmin V. V. Influence of Hydraulic Oil Brands on the Completeness and Accuracy of Diagnostics of Hydraulic Units of Russian and Foreign Production	373
Miftakhov E. N., Mustafina S. I., Morozkin N. D., Nasyrov I. Sh., Mustafina S. A. Evaluating the Efficiency of the Tube Turbulent Apparatus Influence on Kinetics of Polymer Production Processes	388
Zhalnin E. V., Chaplygin M. E. Improving the Design of Combine Harvesters by Harmonizing Their Basic Technical Parameters	403

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Gavrilov A. V., Gerber Yu. B. Investigating the Influence of the Belt IR Dryer Regime Parameters on Kinetics of Carrot Drying Process	417
Dolgikh P. P., Trepuz S. V., Khanipova V. A., Senkevich O. V. Results of Photobiological Studies on Growing Lettuce under Multispectral Radiation Sources	435
<i>Information for Authors and Readers of the Journal</i>	452

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.33:001.8

doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.302-320

Оригинальная статья



Результаты исследований усовершенствованной сошниковой группы посадочной машины

А. С. Дорохов, А. Г. Пономарев, В. Н. Зернов,
С. Н. Петухов, А. Г. Аксенов, А. В. Сибирев ✉

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ sibirev2011@yandex.ru

Аннотация

Введение. Конструктивные схемы сошников и в целом сошниковых групп картофелесажалок в статье обосновываются исходя из морфологических особенностей картофельного растения, его требований к условиям произрастания и обеспечения качественного выполнения технологического процесса посадки. Назначение сошниковых групп – формирование ложа для размещения посадочных клубней с рыхлой прослойкой почвы в 5–8 см и заделка их разрыхленной почвой на определенную глубину.

Цель статьи. Разработать технологическую схему и обосновать конструктивные параметры сошниковых групп картофелепосадочных машин, наиболее полно удовлетворяющих требованиям условий произрастания картофельного растения.

Материалы и методы. Выполнен сравнительный анализ силовой оценки бороздораскрывающих рабочих органов, определены качественные показатели выполнения технологического процесса посадки. Разработана экспериментальная конструкция сошниковых групп картофелесажалок с системой копирования неровностей рельефа поля путем коррекции угла атаки сошника.

Результаты исследования. Экспериментальными исследованиями оптимизированы параметры подвески сошника, обеспечивающие автоматическое копирование неровностей микрорельефа поля глубиной до 20 см в пределах исходных требований на картофелепосадочные машины.

Обсуждение и заключение. Наиболее полно удовлетворяют требованиям к условиям произрастания картофельного растения сошники с индивидуальной плавающей подвеской и острым углом вхождения в почву. Автоматическое поддержание заданной глубины хода сошника в пределах исходных требований (± 2 см) при неровностях микрорельефа поля до 20 см обеспечивает сошниковая группа с соотношением сторон подвески 150:200:400:400 мм.

Ключевые слова: морфологические особенности, картофельное растение, картофелесажалки, сошниковые группы, угол атаки, подвеска сошника, глубина хода, автоматическая стабилизация, исходные требования

© Дорохов А. С., Пономарев А. Г., Зернов В. Н., Петухов С. Н., Аксенов А. Г., Сибирев 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.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (СП-1004.2021.1).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Результаты исследований усовершенствованной сошниковой группы посадочной машины / А. С. Дорохов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 302–320. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.302-320>

Original article

Research Results of the Improved Coulter Group of the Planter

A. S. Dorokhov, A. G. Ponomarev, V. N. Zernov,
S. N. Petukhov, A. G. Aksenov, A. V. Sibirev 

Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)

 sibirev2011@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article substantiates the design schemes of coulters and, in general, coulters groups of potato planters based on the morphological features of the potato plant, its requirements for growing conditions and ensuring the high-quality performance of the planting process. The purpose of the coulters groups is to form a bed for placing seed tubers with a loose soil layer of 5–8 cm and to cover seed tubers with loose soil to a certain depth.

Aim of the Article. The study is aimed at developing technological scheme and substantiating constructive parameters of coulters groups of potato planters, which meet most requirements for the conditions of potato plant growing.

Materials and Methods. A comparative analysis of force estimation of furrow-opening working bodies is carried out and qualitative indicators of technological process of planting are determined. There is developed an experimental design of coulters groups of potato planters with the system for automatic maintenance of the depth of potato planting by correcting the angle of coulters attack if there are the field relief irregularities.

Results. Experimental studies optimized the parameters of a coulters suspension providing automatic maintenance of the depth of potato planting while detecting field micro-relief irregularities up to 20 cm deep within the initial requirements for potato planters.

Discussion and Conclusion. The coulters with an individual floating suspension and an acute angle of entry into the soil most fully meet the requirements for the growing conditions of a potato plant. Automatic maintenance of the specified coulters travel depth within the initial requirements (± 2 cm) with field micro-relief irregularities up to 200 mm is provided by a coulters group with a suspension aspect ratio of 150:200:400:400 cm.

Keywords: morphological features, potato plant, potato planters, coulters groups, angle of attack, coulters suspension, travel depth, automatic stabilization, initial requirements

Funding: The study was supported by the Grants Council of the President of the Russian Federation (SP-1004.2021.1).

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

For citation: Dorokhov A.S., Ponomarev A.G., Zernov V.N., Petukhov S.N., Aksenov A.G., Sibirev A.V. Research Results of the Improved Coulter Group of the Planter. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):302–320. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.302-320>

Введение

К сошниковым группам картофеле-сажалок относят сошники с бороздозакрывающими рабочими органами, назначение которых – формирование ложа для размещения посадочных клубней и заделка их на определенную глубину. В настоящее время наиболее распространёнными являются анкерные сошники с тупым углом вхождения в почву и жесткой или индивидуальной плавающей подвеской (зарубежные сажалки). Сажалки советского производства оснащались сошниками с острым углом вхождения в почву и индивидуальной плавающей подвеской [1–4].

Важным фактором является воздействие сошника на плотность почвы – уплотнение дна и стенок борозды или рыхление. Рыхлый слой почвы в борозде обеспечивает нормальные всходы. При достаточно хорошем рыхлении дна борозды уменьшается раскатывание клубней при посадке, мощность корневой системы увеличивается, что обеспечивает получение более высоких урожаев.

Основные требования к сошниковым группам картофелесажалок заключаются в следующем: дно борозды не должно быть уплотненным; прослойка рыхлой почвы на дне борозды должна быть 4–5 см; при внесении минеральных удобрений между клубнями и удобрениями должна быть обеспечена прослойка рыхлой почвы толщиной не менее 2 см; подвеска сошника должна удовлетворительно копировать неровности поля высотой до 15 см; отклонение от заданной глубины посадки клубней не должно превышать 2 см.

Основным функционирующим элементом, оказывающим определяющее влияние на показатели качества посадки картофеля, являются сошниковые группы машин, так как они – последние элементы, взаимодействующие с посадочным материалом.

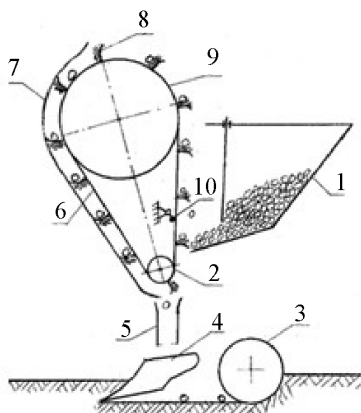
Разработка инновационных технологических схем сошниковых групп картофелепосадочных машин, обеспечивающих повышение качественных показателей выполнения процесса посадки картофеля, является актуальной проблемой, имеющей большое значение для АПК России.

Цель исследования – обосновать тип сошников картофелесажалки, наиболее полно удовлетворяющих требованиям к условиям произрастания картофельного растения. Оптимизировать параметры сошниковых групп, автоматически обеспечивающих стабильность глубины хода сошника в пределах исходных требований на картофелепосадочные машины при копировании неровностей микро-рельефа поля.

Обзор литературы

До настоящего времени в организациях, занимающихся оригинальным семеноводством картофеля, посадку мини-клубней осуществляют либо вручную, либо используют полуавтоматические клоновые посадочные машины там, где они есть [5–7]. Сравнительные результаты расчетов технико-экономических показателей полуавтоматических и автоматических селекционно-семеноводческих посадочных машин представлены в работе А. Г. Пономарева и его соавторов [2]. Для посадки клубней картофеля на площади более 2–8 га используются автоматические посадочные машины высокой производительности (рис. 1).

Основным функционирующим элементом, оказывающим определяющее влияние на показатели качества посадки, являются бороздораскрывающие (сошники) и бороздозакрывающие (заделывающие органы) рабочие органы, так как они являются последними элементами, взаимодействующими с посадочным материалом, от конструктивного исполнения которых зависит в итоге урожайность и качество товарной продукции.



Р и с. 1. Технологическая схема машины для автоматической посадки мини-клубней картофеля в оригинальном семеноводстве: 1 – бункер; 2 – ролик ведущий; 3 – заделывающий орган; 4 – сошник; 5 – семяпровод; 6 – лента транспортерная; 7 – направляющий кожух; 8 – приемная чаша; 9 – барабан; 10 – встряхиватель

F i g. 1. Technological scheme of the machine for automatic planting of mini potatoes in the original seed production: 1 – bunker; 2 – bypass roller; 3 – closing body; 4 – coulter; 5 – seed tube; 6 – conveyor belt; 7 – protective cover; 8 – planting spoons; 9 – drum; 10 – shaker

В настоящее время в большинстве конструкций посадочных машин в качестве заделывающих элементов используют дисковые рабочие органы, выполненные в форме выпуклой сферической поверхности.

Дисковый заделывающий орган прицепной четырехрядной посадочной машины модели GL 34 T (рис. 2) состоит из двух параллельно расположенных загортачей сферического типа [8–10].



Р и с. 2. Прицепная 4-рядная посадочная машина модели GL 34 T

F i g. 2. Trailed 4-row potato planter GL 34 T

К основным недостаткам посадочной машины фирмы Grimme по результатам исследований показателей качества ее работы при реализации научно-технической Программы Союзного государства «Инновационное развитие производства картофеля и топинамбура» (2013–2016 гг.) следует отнести:

- неравномерность распределения клубней по глубине и длине засеваемой борозды (равномерность редко превышает 40 % и не соответствует агротехническим требованиям);
- низкую рабочую скорость, а следовательно, и низкую производительность;
- высокую энергоемкость конструкции и рабочего процесса.

В настоящее время в Республике Беларусь производится усовершенствованная посадочная машина СКМ-4 МВЗ по лицензии широко известного немецкого производителя Cramer (Cramer GmbH) (рис. 3).

Конструктивно посадочная машина СКМ-4 МВЗ является аналогом флагмана модельного ряда картофелесажалок

Cramer – MARATHON JUMBO. Ее основное отличие – метод посадки ложечками на стальной цепи.

К недостаткам посадочной машины СКМ-4 МВЗ следует отнести сложность изготовления и замены ложечки в случае повреждения, а также сгруживание почвы заделывающими элементами при раскладке клубней по борозде. Данные недостатки присущи четырехрядной прицепной посадочной машине модели KORA 4HP фирмы Unia Group (Польша) с гидравлически поднимаемым бункером емкостью 2 000 (2 200 кг)¹. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время на картофелепосадочных машинах применяются цепочно-ложечные (фирмы «Лидсельмаш», Vomet) и ложечно-элеваторные (фирмы Grimme, Cramer) высаживающие аппараты, имеющие в качестве заделывающих элементов сошники анкерного типа и сферические диски.

В технологическом процессе работы этих аппаратов есть минус – недостаточная равномерность распределения



Р и с. 3. Прицепная 4-рядная посадочная машина СКМ-4 МВЗ
F i g. 3. Trailed 4-row potato planter SKM-4 MVZ

¹ Машинные технологии и техника для производства картофеля / С. С. Туболев [и др.]. М. : Агроспас, 2010. 316 с. ; Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие / В. И. Балабанов [и др.]. М. : Российский государственный аграрный университет. МСХА им. К. А. Тимирязева, 2013. 143 с. EDN: RLUIBJ

клубней, которая составляет от 50 % [11], что в том числе и свидетельствует о значительных недостатках конструкции бороздораскрывающих и бороздозакрывающих рабочих органов посевных и посадочных машин, оказывающих влияние на равномерность распределения посадочного материала в борозде.

Значительный эмпирический материал, накопленный по технологическому процессу работы сошников и заделывающих органов, воздействию их конструктивных и технологических параметров на качество заделки посевного и посадочного материала, не учитывает влияние морфологических особенностей картофельного растения. В настоящее время они недостаточно изучены. В исследование данного вопроса значительный вклад внесли П. А. Емельянов [12], В. Н. Зернов [3], Е. С. Зыкин, В. И. Курдюмов, Е. С. Прошкин, В. Е. Прошкин, И. А. Шаронов², Н. П. Ларюшин, О. Н. Кухарев³, С. С. Казаков [6], А. Б. Калинин [7], С. Н. Петухов [1] и др.

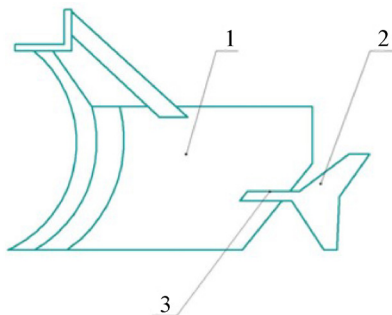
Известен сошник (рис. 4) посадочной машины с корпусом и заделывающими элементами, выполненными в виде стрелчатых лап, расположенных за щеками корпуса под углом в вертикальной

и горизонтальной плоскостях и связанных со щеками горизонтальными ножами [12]. Сошник состоит из корпуса 1 со щеками и заделывающими элементами 2 в виде стрелчатых лап, которые присоединяются к корпусу по середине задних частей щек с помощью горизонтально установленных ножей 3.

К недостаткам данного заделывающего органа следует отнести то, что они не устраняют сводообразований и пустот при заделке корневых систем, что отрицательно сказывается на их приживаемости.

Известно дисковое заделывающее устройство [12], которое состоит из сферических дисковых загорточей 1, хомутов 2 со стопорными болтами 3 и контргайками 4, кривошипов 5, шатунов 6, шарнирных соединений 7, ползуна 8 со стопорным болтом 9 и контргайкой 10, смонтированных на Т-образной рамке 11 (рис. 5).

Устройство работает следующим образом. При движении по полю, будучи установлено на культиватор или присоединено к мотоблоку, устройство сферическими дисковыми загорточами осуществляет заделку борозды. На месте борозды образуется гребень заданного профиля и высоты [12]. Недостатками указанного устройства являются малый

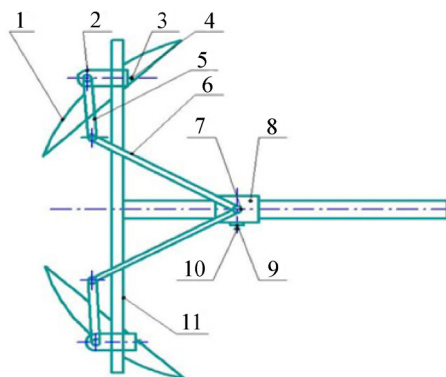


Р и с. 4. Сошник комбинированный: 1 – корпус;
2 – заделывающий орган в виде стрелчатой лапы; 3 – нож

Fig. 4. Combined coulter: 1 – body; 2 – lancet-shaped embedding device; 3 – knife

² Оптимизация параметров прикатывающего устройства комбинированного посевного агрегата / В. И. Курдюмов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 1. С. 34–37. EDN: RYYWPR

³ Kukharev O. N. Larushin N. P. A Device for Guiding of Bodies of Irregular Shape // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Vol. 9, Issue 3. P. 30–33.



Р и с. 5. Устройство для заделки борозд: 1 – загортак дисковый; 2 – хомут; 3 – болт стопорный; 4, 10 – контргайка; 5 – кривошип; 6 – шатун; 7 – соединение шарнирное; 8 – ползун; 9 – болт стопорный; 11 – рамка Т-образная

F i g. 5. Furrow plugging device: 1 – disk harrow; 2 – clamp; 3 – locking bolt; 4, 10 – locknut; 5 – crank; 6 – connecting rod; 7 – swivel joint; 8 – slider; 9 – locking bolt; 11 – T-shaped frame

диапазон регулировки углов атаки дисковых загортак, низкая точность регулировок (колебания во время работы) и повышенная материалоемкость устройства. Несовершенство конструкции высаживающего аппарата, а также бороздораскрывающих (сошников) и бороздозакрывающих (заделывающих) рабочих органов не позволяет обеспечить технологический процесс посадки в соответствии с агротехническими требованиями⁴. Следовательно, разработка инновационной технологии и машин для выполнения комплекса работ в семеноводстве картофеля, обеспечивающих повышение качественных показателей выполнения технологического процесса посадки, является актуальной проблемой, имеющей большое значение для АПК России.

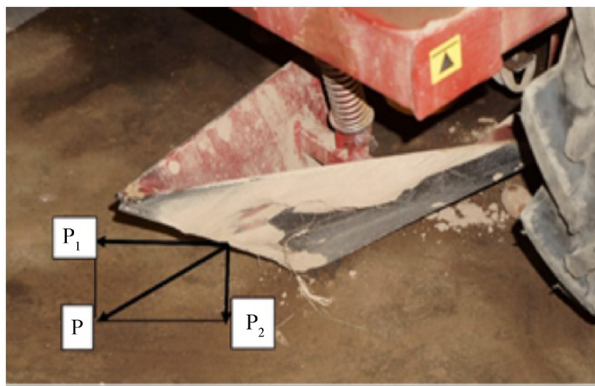
Материалы и методы

Для решения поставленной задачи предлагается усовершенствованная технологическая схема работы и конструкция сошниковых групп картофелесажалок. Сошник с тупым углом вхождения стремится выглубиться под действием

реакции почвы от силы P_2 (рис. 6). На установленной глубине он удерживается под действием веса сажалки, значительно разгружая при этом опорно-приводные колеса машины. Это приводит к уменьшению сцепления приводного колеса с почвой и его проскальзыванию, увеличивая при этом заданный шаг посадки вплоть до образования пропусков.

Незначительные колебания величин плотности почвы на разных участках поля существенно изменяют величину тяговой силы P_1 , а следовательно, и реакцию почвы от также изменяющейся своей величины от результирующей силы P . Все это влияет на глубину хода сошника вплоть до появления на поверхности поля посадочных клубней (не присыпанные почвой клубни). Кроме того, на неравномерность глубины посадки клубней влияют неровности поля, особенно это сказывается при жесткой подвеске сошника. Сошник с тупым углом вхождения в почву вдавливают частицы почвы в дно борозды и сдвигает их в стороны.

⁴ Машинные технологии и техника для производства картофеля / С. С. Туболев [и др.]. М. : Агроспас, 2010. 316 с.; Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие / В. И. Балабанов [и др.]. М. : Российский государственный аграрный университет. МСХА им. К. А. Тимирязева, 2013. 143 с. EDN: RLUIBJ

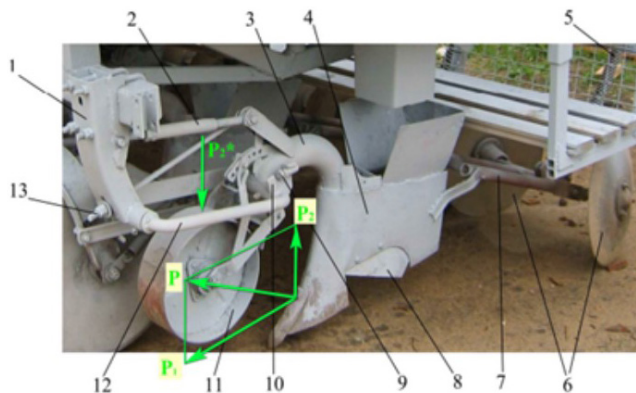


Р и с. 6. Сошник с тупым углом вхождения в почву картофелесажалки Л-202:
 P_1 – тяговая сила от трактора; P_2 – сила от действия веса сажалки; P – результирующая сила
 F i g. 6. Coulters with an obtuse angle of entry into the soil of the potato planter L-202:
 P_1 – traction force from the tractor; P_2 – planter weight force; P – resulting force

В результате дно и стенки борозды уплотняются. Особенно это явление усиливается на тяжелых с переменной по длине гона влажностью почвах.

Сошник с острым углом вхождения в почву работает в режиме самозаглубления. Углубиться в почву сошник стремится под действием реакции почвы от силы P_2 (рис. 7) – вертикальной составляющей от результирующей силы P при приложении

со стороны трактора тягового усилия P_1 . Ограничивает глубину хода сошника копирующее колесо. При этом сошник не уплотняет, а рыхлит дно и стенки борозды. Для увеличения толщины рыхлого слоя на дне борозды, а при работе с удобрениями, образования почвенной прослойки между удобрениями и клубнями в лобовой части корпуса сошника обычно предусматривают отвальчики 8.



Р и с. 7. Сошниковая группа клоновой картофелесажалки КСУ-4 (ВИМ):
 1 – кронштейн крепления сошника к раме сажалки; 2 – верхняя тяга подвески;
 3 – кронштейн сошника; 4 – сошник; 5 – нажимная штанга; 6 – бороздозакрывающие диски;
 7 – рамка крепления дисков; 8 – отвальчик; 9 – регулировочный болт упора; 10 – упор;
 11 – копирующее колесо; 12 – нижняя тяга подвески; 13 – диагональная тяга

F i g. 7. Coulters group of clone potato planter KSU-4 (VIM):
 1 – bracket for fastening the coulters to the frame of the planter; 2 – upper suspension link;
 3 – coulters bracket; 4 – coulters; 5 – push rod; 6 – furrow-closing discs; 7 – disc mounting frame; 8 – dump;
 9 – stop adjusting bolt; 10 – emphasis; 11 – copy wheel; 12 – lower suspension link; 13 – diagonal thrust

На рисунке 7 показана сошниковая группа машины для посадки клонов картофеля конструкции ФГБНУ ФНАЦ ВИМ с самозаглубляющимися сошниками и индивидуальной плавающей подвеской параллелограммного типа. Данные сошники устанавливались на картофелесажалках советского производства СН-4Б, СКС-4, КСМ-4 и других машинах.

Угол вхождения сошника 4 в почву, в зависимости от ее плотности, задается длиной верхней тяги подвески 2. Изменение глубины хода сошника осуществляется поворотом вилки копирующего колеса 11 относительно кронштейна сошника. В передней части корпуса сошника имеется щиток, образующий канал для направления туков минеральных удобрений в сформированное носком сошника ложе. Отвальчики 8 образуют рыхлый слой почвы на дне борозды и обеспечивают почвенную прослойку между удобрением и клубнями. Для ограничения опускания сошника при переводе сажалки в транспортное положение на конце тяги 12 имеется упор 10. Перед упором в кронштейне сошника 3 установлен регулировочный болт 9. Этот болт касается упора тяги 10 при подъеме сажалки в транспортное положение.

В параллелограмме предусмотрена диагональная тяга 13, один конец которой шарнирно прикреплен к кронштейну сошника, а другой – с резьбой и навинченной гайкой – пропущен через прорезь переднего кронштейна 1. Тяга ограничивает подъем сошника, не позволяя корпусу сошника опираться в конструктивные элементы сажалки во время работы. К боковинам сошника шарнирно присоединена рамка 7 для крепления через «кривые» полуоси бороздозакрывающих дисков 6 и прижимной телескопической штанги 5. Верхняя часть штанги 5 шарнирно прикреплена к раме сажалки. Полуоси бороздозакрывающих дисков имеют возможность

поворачиваться относительно рамки с целью регулирования угла атаки дисков, что определяет форму гребня. В штанге 5 предусмотрены отверстия для регулировки сжатия нажимной пружины, а следовательно, и давления дисков на почву, что оказывает влияние на глубину заделки клубней и высоту гребней. Наличие в конструкции сошниковой группы сошника с острым углом вхождения в почву, копирующего колеса и параллелограммной плавающей подвески с длиной продольных тяг 400 мм, позволяет удовлетворительно копировать неровности поля высотой до 15 см. Отвальчики 8 в лобовой части корпуса сошника обеспечивают на дне борозды рыхлый слой почвы до 5 см.

К недостаткам рассматриваемых сошниковых групп с острым углом вхождения сошника в почву можно отнести то, что, несмотря на копирование ими неровностей поля, глубина посадки клубней в почву остается не всегда равномерной. Происходит это из-за того, что во время копирования неровностей поля при перемещении сошника вниз по вертикали носок сошника попадает в более плотные слои почвы, а так как параллелограммный механизм подвески сохраняет угол атаки сошника постоянным, то реакция почвы от действия вертикальной составляющей P_2 и равнодействующей силы P увеличивается. Пропорционально увеличивается и вертикальная составляющая силы, прижимающей копирующее колесо к почве P_2 ; под действием этой силы, копирующее колесо вдавливаются в рыхлый поверхностный слой почвы, в результате глубина посадки клубней увеличивается (неравномерность глубины посадки по длине гона, в зависимости от плотности почвы, достигает ± 4 см). Неравномерность глубины хода сошника сказывается на дружности всходов, особенно это заметно при посадке миниклубней в элитном семеноводстве картофеля.

Величина и направление равнодействующей силы P (рис. 6) зависит от рабочей скорости посадочного агрегата, глубины хода сошника, плотности почвы, ее влажности, коэффициента трения поверхности сошника с почвой и угла вхождения сошника в почву (угла атаки). Реально в конструкции сошниковой группы мы можем воздействовать на величину угла вхождения сошника в почву. При увеличении угла атаки сошник пытается углубиться в почву, этому препятствует сила P_2 со стороны копирующего колеса II (рис. 6), вдавливая его в почву. При уменьшении угла атаки сошника сила P_2 уменьшается и копирующее колесо меньше вдавливается в почву. Для стабилизации хода сошника на заданной глубине при копировании неровностей необходимо обеспечить автоматическое изменение величины угла атаки β (рис. 8) в зависимости от изменения микрорельефа поля.

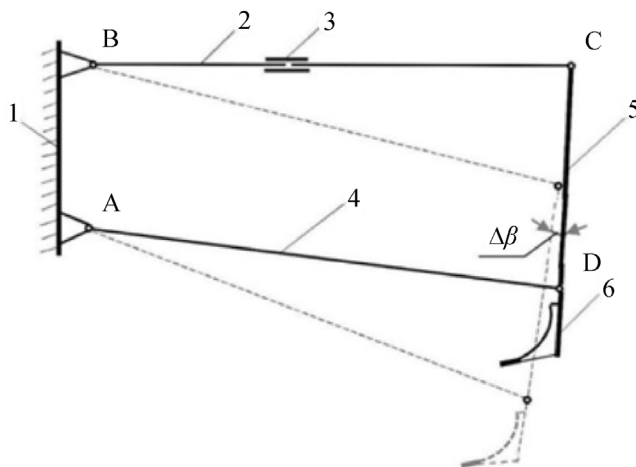
Результаты исследования

Поставленная техническая задача достигается тем, что в сошниковой группе картофелесажалки индивидуальная плавающая подвеска сошника (рис. 8 и рис. 9) представляет собой не параллелограмм, а шарнирный четырехугольник

со сторонами, образованными кронштейном крепления сошниковой группы к раме сажалки 1 (сторона AB), корпусом сошника 5 (сторона CD) и продольными верхней 2 (сторона BC) и нижней 4 (сторона AD) тягами. При этом расстояние между шарнирами стороны 1 меньше чем стороны 5 , а верхняя 2 и нижняя 4 тяги между собой равны. Причем прямая AB , проходящая через точки крепления продольных тяг к кронштейну крепления сошниковой группы, перпендикулярна поверхности поля, а верхняя тяга подвески имеет телескопическую муфту 3 для установки первоначально заданного угла атаки сошника.

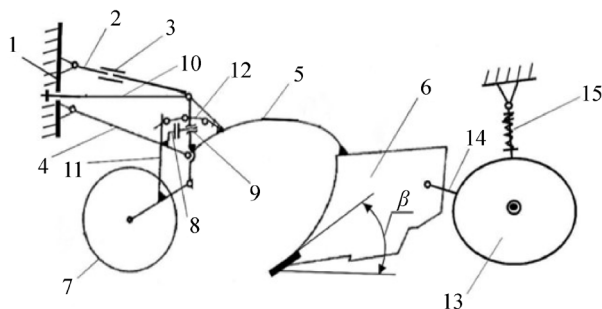
Величина изменения угла атаки $\Delta\beta$ в зависимости от изменения глубины хода сошника достигается за счет уменьшения расстояния между шарнирами четырехугольника стороны 1 по отношению к стороне 5 (рис. 9).

Разработанная сошниковая группа картофелесажалки с автоматической стабилизацией глубины посадки (рис. 9) содержит кронштейн крепления сошника к раме сажалки 1 , верхнюю тягу 2 подвески сошника с телескопической муфтой 3 для установки первоначально заданного угла атаки сошника β , нижнюю тягу



Р и с. 8. Принципиальная схема работы индивидуальной плавающей подвески сошника

Fig. 8. Schematic diagram of the operation of an individual floating coulter suspension



Р и с. 9. Сошниковая группа картофелесажалки с автоматической стабилизацией глубины посадки
 F i g. 9. Coulter group of a potato planter with automatic stabilization of planting depth

подвески сошника 4, корпус сошника 5, сошник 6, копирующее колесо 7, упор ограничителя опускания сошника 8, регулировочный болт упора 9, диагональную тягу ограничителя подъема сошника 10, вилку копирующего колеса 11, сектор регулировки глубины хода сошника 12, бороздозакрывающие диски 13, рамку крепления дисков 14, подпружиненную нажимную штангу 15. Подготовка к работе сошниковой группы и процесс копирования неровностей поля заключается в следующем.

Первоначально заданный угол вхождения сошника 6 в почву обеспечивается длиной верхней тяги 2 подвески с помощью телескопической муфты 3. Глубина хода сошника 6 задается поворотом вилки 11 копирующего колеса 7 относительно сектора 12, закрепленного на корпусе сошника. Острый угол вхождения сошника в почву рыхлит дно борозды.

Путем регулирования длины болта 9 и изменения положения гайки на тяге 10 добиваются необходимой величины хода сошника в вертикальном направлении, что обеспечивает возможность копирования неровностей поля.

Глубина хода сошника 6 задается и поддерживается копирующим колесом 7. В момент преодоления сошниковой группой неровностей поля и перемещения при этом сошника вниз по вертикали, носок сошника попадает в более

плотные слои почвы. При этом равнодействующая сил сопротивления почвы на сошник увеличивается, но за счет заданного соотношения сторон четырехзвенного механизма подвески угол атаки сошника 6 уменьшается, а вертикальная составляющая равнодействующей сил сопротивления почвы остается примерно постоянной. Постоянной величиной остается и вертикальная составляющая силы прижимающей копирующее колесо к почве. В результате копирующее колесо вдавливаются в поверхностный слой почвы примерно на одинаковую величину, и образованное сошником ложе для клубней на дне борозды автоматически стабилизируется на заданной глубине.

С целью оптимизации соотношения размеров тяг подвески, обеспечивающих наиболее стабильный ход сошника по глубине, в экспериментальных исследованиях было принято четыре варианта длин сторон четырехзвенного механизма (рис. 8) с их соотношением АВ:СD:ВС:АD соответственно:

- а) 4:4:8:8 или в мм 200:200:400:400 – параллелограмм;
- б) 3:4:8:8 в мм 150:200:400:400;
- в) 2:4:8:8 в мм 100:200:400:400;
- г) 1:4:8:8 в мм 50:200:400:400.

Исследования экспериментальных сошниковых групп проводились на двухрядной клоновой посадочной машине, разработанной и изготовленной опытным заводом ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (рис. 10).



Р и с. 10. Экспериментальная сошниковая группа на клоновой посадочной машине

F i g. 10. Experimental coulter group on a clone planter

Место проведения испытаний – опытное поле ООО «Редкинская АПК» Тверской области Конаковского района, д. Кошелево. Сажалка во время испытаний агрегатировалась с трактором марки МТЗ-82 тягового класса 1,4.

Тип почвы при испытаниях – дерново-подзолистая (легкий суглинок), структура – мелкокомковатая, рельеф – ровный, микрорельеф – гребнистый с перепадом гребней до 200 мм.

Влажность почвы и твердость в слоях соответственно:

от 0 до 5 см	14,5 %	0,35 Мпа
от 5 до 10 см	16,7 %	0,54 Мпа
от 10 до 15 см	19,5 %	1,29 Мпа
от 15 до 20 см	22,8 %	1,34 Мпа

Температура почвы во время испытаний в слое от 0 до 20 см составляла +10,0 °С при температуре воздуха +12,0 °С.

С целью получения корректно сравниваемых экспериментальных данных для проведения испытаний был подготовлен участок поля со специально нарезанным микрорельефом (рис. 11).

Экспресс-оценка микрорельефа поверхности экспериментального участка поля проводилась на контрольных участках протяженностью 5 м (рис. 12). Это

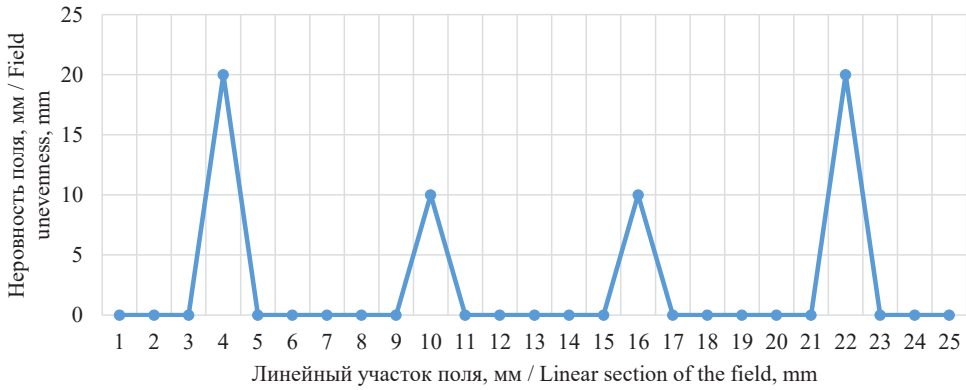
позволило осуществлять достоверную сравнительную оценку испытываемых сошниковых групп картофелесажалок [13–15]. При проведении исследований на двухрядную клоновую сажалку поочередно устанавливали четыре пары сошников с разным соотношением длин тяг подвески согласно плану эксперимента и в трехкратной повторности прокатывали сажалку по экспериментальному участку поля в направлении, перпендикулярном нарезанным неровностям, с постоянной скоростью перемещения агрегата 1,2 м/с.

Под глубиной хода сошника подразумевали расстояние от поверхности поля, сформированной после прохода сажалки с приподнятыми заделывающими дисками (края образованного ложа для клубней), до рыхлого слоя дна борозды [16–18]. Замеры глубины хода сошника на линейном участке экспериментального поля проводили через каждые 0,2 м.

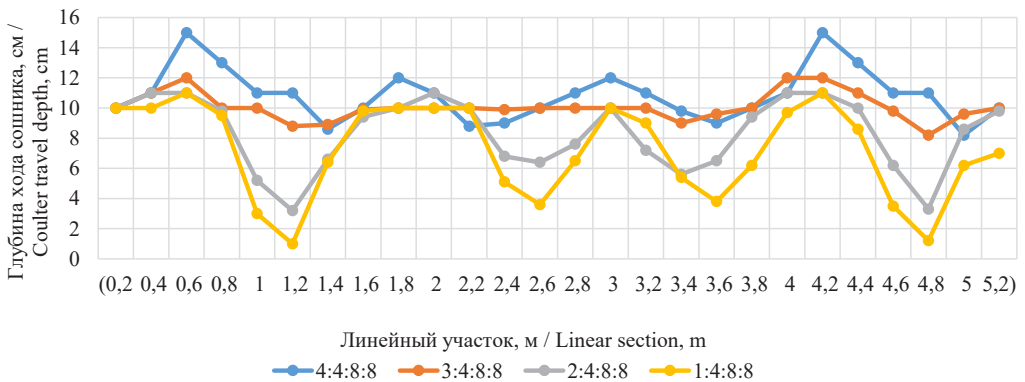
Из шести повторов замеров по каждой точке (2 сошника по 3 повторности) определяли среднее значение и строили графики глубины хода сошников по каждому типоразмеру подвески (рис. 13).



Р и с. 11. Экспериментальный участок поля
F i g. 11. Experimental section of the field



Р и с. 12. Микрорельеф экспериментального участка поля
F i g. 12. Microrelief of the experimental area of the field



Р и с. 13. Влияние соотношения сторон подвески на равномерность хода сошника
F i g. 13. Influence of suspension side ratio on coulters travel uniformity

Затем по каждой сошниковой группе определялись средние значения глубины хода сошника из средних по точкам замеров, средние квадратичные отклонения и коэффициенты вариации.

Результаты испытаний после математической обработки полученных данных приведены в таблице 1.

Графические изображения на рисунке 13 наглядно показывают влияние соотношения сторон подвески сошника на отклонения глубины его хода от заданной при прохождении неровностей поверхности поля.

Отклонение глубины хода сошника с классической параллелограммной подвеской (200:200:400:400) наблюдается в сторону увеличения в пределах 4 см от заданной на неровностях поля до 20 см, что превышает исходные требования на 2 см. При неровностях поля до 10 см данная сошниковая группа вполне удовлетворяет исходным требованиям.

У сошниковой группы с соотношением сторон подвески 150:200:400:400 отклонения глубины хода от заданной не превышают 2 см даже при неровностях поля 20 см, при этом средняя глубина хода сошника остается на уровне заданной.

Ход сошника третьего типа подвески (100:200:400:400) отклоняется от заданной величины в сторону уменьшения

до 6 см глубины при неровностях поля 10 см и до глубины 3 см при неровности микрорельефа до 20 см, что превышает предельные допуски, определенные исходными требованиями на картофелепосадочные машины.

Глубина хода четвертого типа подвески сошников (50:200:400:400) еще больше отклоняется от заданной, при неровностях в 20 см дно борозды практически выходит на поверхность поля.

Отклонения хода сошников третьего и четвертого типов подвесок в сторону уменьшения глубины от заданной объясняется уменьшением угла атаки сошника β до отрицательного значения, что вызывает резкое его выглубление и за счет сил инерции стремление выйти на поверхность поля. Очевидно, что при увеличении скорости посадочного агрегата качество работы последних двух типов подвесок сошников еще более ухудшится и перейдет в колебательные движения. Следовательно, третий и четвертый типы подвесок неприемлемы как неудовлетворяющие исходным требованиям на картофелепосадочные машины.

Выводы из анализа графиков, представленные на рисунке 13, подтверждаются усредненными вероятностными показателями (табл. 1). Так, среднее значение глубины хода сошника

Таблица 1

Table 1

Равномерность глубины хода сошника в зависимости от соотношения сторон его подвески
Uniformity of coulter travel depth depending on the ratio of the coulter suspension sides

Соотношения сторон подвески сошника, мм / Ratios of the parties of a suspension bracket of an opener, mm	$\Delta\beta^*$ при высоте неровностей, мм / $\Delta\beta$ at the height of irregularities, mm		Глубина хода сошника, см / Coulter move depth, sm					
	100	200	заданная / given	макс / max	мин / min	Среднее / Average	\pm см	V %
200:200:400:400	0°	0°	10,0	15,0	8,0	10,8	3,67	34,0
150:200:400:400	6°	7°	10,0	12,0	8,0	10,0	1,78	17,8
100:200:400:400	10°	16°	10,0	11,0	3,0	8,1	3,92	48,4
50:200:400:400	18°	29°	10,0	11,0	0,5	6,8	5,28	77,6

* $\Delta\beta$ – изменение угла атаки сошника при преодолении неровностей / changing the angle of attack of the coulter when overcoming irregularities.

с параллелограммной подвеской незначительно (на 0,8 см) отклоняется от заданной в сторону увеличения при среднем квадратичном отклонении $\pm 3,67$ см и коэффициенте вариации 77,6 %. Среднее значение глубины хода сошника с соотношением сторон подвески 150:200:400:400 соответствует заданному его значению с гораздо менее значительными средним квадратичным отклонением $\pm 1,78$ см и коэффициентом вариации 17,8 %.

Средние значения и вариационные показатели подвесок с соотношением сторон 100:200:400:400 и 50:200:400:400 далеко выходят за пределы исходных требований на картофелепосадочные машины и поэтому не могут быть применены на сажалках при практическом производстве картофеля.

Обсуждение и заключение

Наиболее полно удовлетворяют требованиям к условиям произрастания картофельного растения сошники

с индивидуальной плавающей подвеской и острым углом вхождения в почву. Автоматическое поддержание заданной глубины хода сошника в пределах исходных требований (± 2 см) к картофелепосадочным машинам при неровностях микрорельефа поля до 200 мм обеспечивает сошниковая группа с соотношением сторон подвески 150:200:400:400 мм и острым углом вхождения сошника в почву. Сошники с параллелограммной подвеской (соотношение длин тяг в мм 200:200:400:400) обеспечивают равномерность глубины хода сошников по длине гона в пределах ± 2 см при неровностях микрорельефа поля до 100 мм.

Уменьшение длины тяги АВ подвески сошника до 100 см и менее вызывает колебательные движения сошника, в результате чего равномерность глубины его хода выходит далеко за пределы исходных требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов С. Н. Состояние технического и технологического обеспечения селекции и оригинального семеноводства картофеля // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4. С. 76–84. EDN: YVECCT
2. Селекции и семеноводству картофеля необходима механизация / А. Г. Пономарев [и др.] // Картофель и овощи. 2017. № 3. С. 22–24. URL: <http://potatoveg.ru/mexanizaciya/selekcii-i-semenovodstvu-kartofelya-neobxodima-mexanizaciya.html> (дата обращения: 20.04.2023).
3. Развитие механизированной посадки картофеля в селекционных и семеноводческих питомниках / В. Н. Зернов [и др.] // Картофель и овощи. 2017. № 12. С. 23–25. URL: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2018/12/12_2017.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
4. Краснощек Н. В. Агроинженерная стратегия: от механизации сельского хозяйства к его интеллектуализации // Тракторы и сельхозмашины. 2010. Т. 77, № 8. С. 5–8. URL: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#! (дата обращения: 20.04.2023).
5. Костенко М. Ю., Костенко Н. А. Вероятностная оценка сепарирующей способности элеватора картофелеуборочной машины // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 12. С. 4. EDN: KYZNFH
6. Казаков С. С., Живаев О. В., Никулин А. В. Конструкционные пути снижения повреждаемости клубней посадочного картофеля при работе цепочно-ложечного высаживающего аппарата // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 3. С. 29–34. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-3-29-34>
7. Калинин А. Б., Теплинский И. З., Кудрявцев П. П. Почвенное состояние в интенсивной технологии // Картофель и овощи. 2016. № 2. С. 35–36. EDN: VQFQSN
8. Azizi P., Dehkordi N. S., Farhadi R. Design, Construction and Evaluation of Potato Digger with Rotary Blade // Cercetari Agronomice in Moldova. 2014. Vol. 47. P. 5–13. URL: <https://clck.ru/bnNAF> (дата обращения: 20.04.2023).

9. Abd El-Rahman M. M. A. Development and Performance Evaluation of a Simple Grading Machine Suitable for Onion Sets // Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering. 2014. Vol. 2, Issue 2. P. 213–226. <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55418>
10. Review Paper Based on Design and Development of an Onion Harvesting Machine / I. Dandekar [et al.] // Journal of Information and Computational Science. 2019. Vol. 9, Issue 12. P. 333–337. URL: <https://www.researchgate.net/publication/339201506> (дата обращения: 20.04.2023).
11. Jothi Shanmugam C., Senthilkumar G. Indigenous Development of Low Cost Harvesting Machine // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, Issue 5. P. 4489–4490. URL: http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0817_6236.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
12. Сошник посадочной машины / П. А. Емельянов [и др.] // Сельский механизатор. 2015. № 4. С. 13–14. URL: <http://selmech.msk.ru/415.html> (дата обращения: 20.04.2023).
13. Выбор и обоснование параметров экологического состояния агроэкосистемы для мониторинга технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур / А. Б. Калинин [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 39. С. 315–319. URL: <https://spbgau.ru/files/nid/3847/39.pdf> (дата обращения: 20.04.2023).
14. Метод комплексной оценки качества выполнения технологических операций энергосберегающей технологии уборки корнеплодов и картофеля / А. С. Дорохов [и др.] // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 1. С. 12–16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-12-16>
15. Экспериментальные исследования по разработке автоматизированной системы регулирования плотности почвы посевной машины / А. С. Дорохов [и др.] // Агроинженерия. 2021. № 2. С. 9–16. URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-02-2021-2.pdf/en/info> (дата обращения: 20.04.2023).
16. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers / M. K. Edriss [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2020. Vol. 13, Issue 2. P. 163–167. URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4818/pdf> (дата обращения: 20.04.2023).
17. Design Modification and Field Testing of Groundnut Digger / M. T. Asghar [et al.] // Asian Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 5, Issue 7. P. 389–394. URL: https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER (дата обращения: 20.04.2023).
18. Research on Polyline Soil-Breaking Blade Subsoiler Based on Subsoiling Soil Model Using Discrete Element Method / K. Zheng [et al.] // Transaction of the CSAM. 2016. Vol. 47, Issue 9. P. 62–72. URL: <https://clck.ru/sKPTb> (дата обращения: 20.04.2023).

Поступила 27.04.2023; одобрена после рецензирования 16.05.2023; принята к публикации 17.06.2023.

Об авторах:

Дорохов Алексей Семенович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научно-организационной работе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, Researcher ID: H-4089-2018, dorokhov@rgau-msha.ru

Пономарев Андрей Григорьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>, agrodiesel@mail.ru

Зернов Виталий Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1443-9407>, techagromash@yandex.ru

Петухов Сергей Николаевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2212-8569>, petuhov61@bk.ru

Аксенов Александр Геннадьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, Researcher ID: V-5572-2017, 1053vim@mail.ru

Сибирев Алексей Викторович, профессор РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, Researcher ID: M-6230-2016, sibirev2011@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

- А. С. Дорохов – формулирование основной концепции исследования.
- А. Г. Пономарев – разработка блок-схемы.
- В. Н. Зернов – разработка конструкции посадочной машины.
- С. Н. Петухов – разработка конструкторской документации.
- А. Г. Аксенов – разработка методологии исследования.
- А. В. Сибирев – литературный и патентный анализ, подготовка начального варианта текста и формулирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Petukhov S.N. The State of Technical and Technological Support of Selection and Original Seed Production of Potatoes. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2018;(4):76–84. Available at: <https://www.elibrary.ru/yvecct> (accessed 06.04.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Ponomarev A.G., Kolchin N.N., Zernov V.N., Petukhov S.N. Mechanization is necessary for breeding and seed growing of potato. *Potatoes and Vegetables*. 2017;(3):22–24. Available at: <http://potatoveg.ru/mexanizaciya/selekcii-i-semenovodstvu-kartofelya-neobxodima-mexanizaciya.html> (accessed 20.04.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Zernov V.N., Ponomarev A.G., Kolchin N.N., Petukhov S.N. Development of Mechanized Planting of Potatoes in Breeding and Seed Nurseries. *Potatoes and Vegetables*. 2017;(12):23–25. Available at: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2018/12/12_2017.pdf (accessed 20.04.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Krasnoshchekov N.V. Agroengineering Strategy: From the Mechanization of Agriculture to Its Intellectualization. *Tractors and Agricultural Machines*. 2010;77(8):5–8. Available at: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#! (accessed 20.04.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Kostenko M.Yu., Kostenko N.A. [Probabilistic Assessment of the Separating Capacity of the Potato Harvester Elevator]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2009;(12):4. Available at: <https://www.elibrary.ru/kyznfh> (accessed 20.04.2023). (In Russ.)
6. Kazakov S.S., Zhivaev O.V., Nikulin A.V. Structural Ways to Reduce the Damage of Planting Potato Tubers During the Operation of a Chain-Spoon Planting Machine. *Tractors and Agricultural Machines*. 2019;(3):29–34. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-3-29-34> (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kalinin A.B., Teplinskiy I.Z., Kudryavtsev P.P. [Soil Condition in Intensive Technology]. *Potato and Vegetables*. 2016;(2):35–36. <https://www.elibrary.ru/vqfqsn> (accessed 20.04.2023). (In Russ.)

8. Azizi P., Dehkordi N.S., Farhadi R. Design, Construction and Evaluation of Potato Digger with Rotary Blade. *Cercetari Agronomice in Moldova*. 2014;47:5–13. Available at: <https://clck.ru/bnNAf> (accessed 20.04.2023).
9. Abd El-Rahman M.M.A. Development and Performance Evaluation of a Simple Grading Machine Suitable for Onion Sets. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2014;2(2):213–226. <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55418>
10. Dandekar I., Joshi A., Patil V. Review Paper Based on Design and Development of an Onion Harvesting Machine. *Journal of Information and Computational Science*. 2019;9(12):333–337. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/339201506> (accessed 20.04.2023).
11. Jothi Shanmugam C., Senthilkumar G. Indigenous Development of Low Cost Harvesting Machine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(5):4489–4490. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_0817_6236.pdf (accessed 20.04.2023).
12. Emelyanov P.A., Sibirev A.V., Aksenov A.G. Opener of the Planting Machine. *Rural Mechanic*. 2015;(4):13–14. Available at: <http://selmech.msk.ru/415.html> (accessed 20.04.2023). (In Russ.)
13. Kalinin A.B., Smelik V.A., Teplinskiy I.Z., Pervukhina O.N. [Selection and Justification of the Parameters of the Ecological State of the Agroecosystem for Monitoring the Technological Processes of Cultivation of Agricultural Crops]. *Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2015;(39):315–319. Available at: <https://spbgau.ru/files/nid/3847/39.pdf> (accessed 20.04.2023). (In Russ.)
14. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. The Method of Complex Assessment of the Quality of the Performance of Technological Operations of Energy-Saving Technology for Harvesting Root Crops and Potatoes. *Agroengineering*. 2022;24(1):12–16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-1-12-16> (In Russ., abstract in Eng.)
15. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Experimental Studies on the Development of an Automated System for Regulating the Density of the Soil of the Sowing Machine. *Agroengineering*. 2021;(2):9–16. Available at: <http://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-02-2021-2.pdf/en/info> (accessed 20.04.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Edrris M.K., Al-Gaadil K.A., Hassaball A.A. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020;13(2):163–167. Available at: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4818/pdf> (accessed 20.04.2023).
17. Asghar M.T., Ghafoor A., Munir A., Iqbal M., Choudhary M.A. Design Modification and Field Testing of Groundnut Digger. *Asian Journal of Science and Technology*. 2014;5(7):389–394. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274373280_DESIGN_MODIFICATION_AND_FIELD_TESTING_OF_GROUNDNUT_DIGGER (accessed 20.04.2023).
18. Zheng K., Jieying H., Li H. Research on Polyline Soil-Breaking Blade Subsoiler Based on Subsoiling Soil Model Using Discrete Element Method. *Transaction of the CSAM*. 2016;47(9):62–72. Available at: <https://clck.ru/sKPTH> (accessed 20.04.2023).

Submitted 27.04.2023; revised 16.05.2023; accepted 17.06.2023.

About the authors:

Aleksey S. Dorokhov, Corresponding Member of RAS, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Deputy Director on Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>, Researcher ID: H-4089-2018, dorokhov@rgau-msha.ru

Andrey G. Ponomarev, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8871-4419>, agrodisel@mail.ru

Vitaliy N. Zernov, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1443-9407>, techagromash@yandex.ru

Sergey N. Petukhov, Cand.Sci. (Agric.), Leading Researcher of the Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2212-8569>, petuxov61@bk.ru

Aleksandr G. Aksenov, Dr.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>, Researcher ID: V-5572-2017, 1053vim@mail.ru

Alexey V. Sibirev, Professor of RAS, Dr.Sci. (Engr.), Senior Researcher of the Department of Technology and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, Researcher ID: M-6230-2016, sibirev2011@yandex.ru

Authors contribution:

A. S. Dorokhov – formulating the basic concept of the study.

A. G. Ponomarev – development of a flowchart.

V. N. Zernov – development the planter design.

S. N. Petukhov – development of design documentation.

A. G. Aksenov – development of a research methodology.

A. V. Sibirev – literary and patent analysis, preparation of the initial version of the text and formation of conclusions.


All authors have read and approved the final manuscript.



Экспериментальные исследования высевающего аппарата зерновой сеялки СУБМ-3,6

В. Ф. Купряшкин , **Н. И. Наумкин**, **А. С. Уланов**,
А. В. Безруков, **А. Д. Комолов**, **Ю. А. Антипов**

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

 kupwf@mail.ru

Аннотация

Введение. Формирование условий для развития научно-технической деятельности и получения результатов, необходимых для создания технологий, продукции, товаров и оказания услуг, обеспечивающих независимость и конкурентоспособность отечественного агропромышленного комплекса, – одна из главных задач обеспечения продовольственной безопасности страны. Наиболее важным и сложным для выполнения сельскохозяйственных операций является посев, осуществляемый посевными агрегатами и машинами, оснащенными высевающими аппаратами, подразделяющимися на механические, пневматические и пневмомеханические.

Цель статьи. Разработка экспериментального стенда и методики проведения экспериментальных исследований высевающего аппарата зерновой сеялки для построения математических моделей его производительности при высеве различных сельскохозяйственных культур: пшеницы, ржи, ячменя, овса, проса, вики.

Материалы и методы. Механический высевающий аппарат катушечного типа используется на одном из самых популярных и повсеместно применимых посевных агрегатах – универсальной блочно-модульной сеялке СУБМ-3,6. Он позволяет обеспечить равномерность норм высева и точную глубину заделки семян. Данные показатели являются основными при оценке качества работы посевных агрегатов. Рассмотрение конструктивных особенностей вышеуказанной сеялки – важный этап при оценке ее производительности.

Результаты исследования. Одной из главных характеристик работы высевающих аппаратов является их производительность. Приведены исследования, направленные на построение математической модели зависимости производительности зернового высевающего аппарата от частоты вращения приводного вала рабочих органов (катушек) n_k (мин⁻¹) и длины вылета катушек l_k (мм). Для этого, в соответствии с современными методами планирования эксперимента, были разработаны экспериментальный стенд и методика проведения экспериментальных исследований производительности высевающего аппарата.

Обсуждение и заключение. Полученные в результате экспериментальных исследований аналитические зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки позволяют наиболее эффективно использовать работу высевающих зерновых катушечных аппаратов, что в свою очередь окажет влияние на выбор оптимальных режимов функционирования сеялки СУБМ-3,6.





Ключевые слова: посев, зерновые культуры, сеялка, катушечный высевашный аппарат, катушка, частота вращения, производительность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Экспериментальные исследования высевашного аппарата зерновой сеялки СУБМ-3,6 / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 321–338. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.321-338>

Original article

Experimental Studies of the Seed-Sowing Device for the Grain Seeder SUBM-3.6

V. F. Kupryashkin , N. I. Naumkin, A. S. Ulanov,
A. V. Bezrukov, A. D. Komolov, Yu. A. Antipov
National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)
 kupwff@mail.ru

Abstract

Introduction. Laying the groundwork for developing scientific and engineering efforts and for obtaining the results necessary to create technologies, products, goods and services that provide the independence and competitiveness of the domestic agro-industrial complex is one of the main tasks for ensuring the food security of Russia. One of the most important and difficult agricultural operations is sowing carried out by seeders equipped with mechanical, pneumatic or pneumatic-mechanical seed-sowing devices.

Aim of the Article. The purpose of the research is to develop an experimental stand and a methodology for conducting experimental studies of the seed-sowing device for a grain seeder to build mathematical models of its performance when sowing various agricultural crops: wheat, rye, barley, oats, millet, vetch.

Materials and Methods. The mechanical roller feed unit is used on one of the most popular and applicable seeder, namely the universal block-modular seeder SUBM-3.6. It allows ensuring the uniformity of the seeding rate and the exact depth of seed embedding. These indicators are the main ones in assessing the performance of seeders. Considering the design features of the above-mentioned seeder is an important step in assessing its productivity.

Results. One of the main characteristics of the seeders is their productivity. In the article, there are presented the studies aimed at constructing a mathematical model of the dependence of the seeders productivity on the rotational speed of the drive shaft of the working bodies (rollers) ν (min^{-1}) and the operating length of the rollers l_c (mm). For this purpose, an experimental stand and methodology for conducting experimental studies of the productivity of the seeders were developed in accordance with modern methods of experiment planning.

Discussion and Conclusion. The analytical dependences of the seeding rate on the rotation frequency and the roller operating length obtained as a result of experimental studies will allow the most efficient use of roller feed units that in turn will influence the choice of optimal operating modes of the seeder SUBM-3.6.

Keywords: sowing, grain crops, seeder, roller feed unit, roller, rotation speed, productivity

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

For citation: Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Ulanov A.S., Bezrukov A.V., Komolov A.D., Antipov Yu.A. Experimental Studies of the Seed-Sowing Device for the Grain Seeder SUBM-3.6. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):321–338. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.321-338>

Введение

Утвержденная правительством РФ федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы направлена на решение важных задач в рамках обеспечения стабильного роста производства сельхозпродукции. Одной из таких задач является формирование условий для развития научной, научно-технической деятельности и получения результатов, необходимых для создания технологий, продукции, товаров и оказания услуг, обеспечивающих независимость и конкурентоспособность отечественного агропромышленного комплекса [1]. В частности, в области производства зерновых и зернобобовых культур в России требуется совершенствование технологий и разработок научно-обоснованных способов их выращивания, обеспечивающих получение стабильно высоких урожаев [2–4].

Посев – наиболее сложная и значимая сельскохозяйственная операция. Для получения высокой урожайности выращиваемых культур, их полноценного роста и развития необходимым условием выступает получение каждым растением нужного количества питательных веществ, тепла, света¹, а также определенной площади питания, которая зависит от заданной нормы высева [5–7], т. е. высева строго определенного количества семян на единицу поля.

В связи с этим проведение экспериментальных исследований зерновой сеялки СУБМ-3,6, а в частности одного из главных его элементов – высевающего аппарата, является актуальной задачей и представляет значительный интерес.

Это обеспечивается за счет применения различных высевающих систем посевных машин и высевающих аппаратов, которые по принципу работы подразделяют на три основных типа: механические, пневматические и пневмомеханические [8; 9].

Обзор литературы

Механические высевающие аппараты получили наибольшее применение в таких посевных агрегатах, как СОН-4,2, СУБМ-3,6, СЗУ-6, СЗТ-3,6, семейства СЗ (АО «Белинсксельмаш», Россия)², Amazone (Германия)³, John Deere (США)⁴, Lemken (Германия)⁵, Берегиня (ООО «Усть-Лабинский машиностроительный завод», Россия)⁶, посевных комплексах AGRATOR M (ПК «Агро-мастер», Россия) и др. [10].

Рассмотрим конструкции механических высевающих аппаратов, применяемых в посевных агрегатах отечественного и зарубежного производства. Также обратим внимание на ряд других конструкторских изысканий, решающих поставленные задачи по равномерности посева сельскохозяйственных культур в соответствии с агротехническими требованиями.

¹ Овчинников В. А. Повышение эффективности машин для посева мелкосеменных культур : монография ; науч. ред. д-р. техн. наук М. Н. Чаткин. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 104 с.

² Сеялки механические зерновые [Электронный ресурс]. URL: <https://bsm.sura.ru/catalog/sejalka> (дата обращения: 10.01.2023).

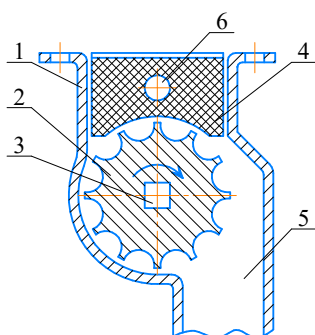
³ Механические сеялки Amazone [Электронный ресурс]. URL: <https://amazone.ru/ru-ru/продукция-и-цифровые-решения/сельскохозяйственная-техника/посевная-техника/механические-сеялки> (дата обращения: 10.01.2023).

⁴ Зерновые механические и пневматические сеялки John Deere [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deere.ua/ru/зерновые-механические-и-пневматические-сеялки> (дата обращения: 10.01.2023).

⁵ Механические сеялки Saphir [Электронный ресурс]. URL: <https://lemken.com/ru-ru/innovacionnye-mashiny/posev/drel-posevnaja/mekhanicheskie-sejalki> (дата обращения: 10.01.2023).

⁶ Механические посевные комплексы AGRATOR M [Электронный ресурс]. URL: <https://pk-agromaster.ru/projects-archive/механические-посевные-комплексы-agrator-m> (дата обращения: 10.01.2023).

Учеными Нижегородского НИИСХ [11] была разработана конструкция катушечного высевача (рис. 1), достоинством которой считается облегчение установки сеялки на заданную норму высева семян и повышение равномерности распределения семян в рядке.



Р и с. 1. Катушечный высевачный аппарат:
1 – корпус; 2 – желобчатая катушка;
3 – приводной вал; 4 – пластмассовая заслонка;
5 – семенной канал и семянаправитель;
6 – валик

F i g. 1. Roller feed unit:
1 – housing; 2 – grooved roller; 3 – drive shaft;
4 – plastic flap; 5 – seed channel and seed guide;
6 – spindle

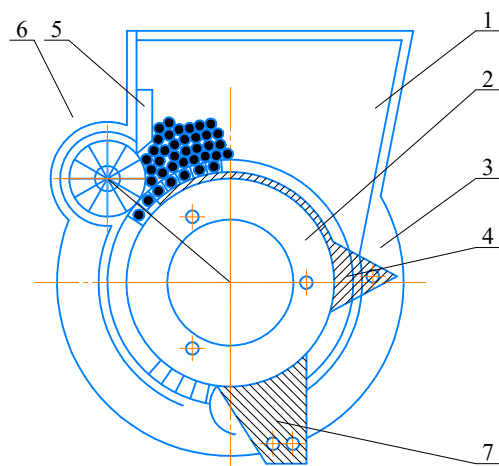
Принцип работы высевача следующий: при движении сеялки катушка высевача, вращаясь, захватывает семена, попавшие в семенной канал, и верхним высевом выбрасывает их в семянаправитель и далее в семяпровод, прикрепленный к корпусу высевача. Регулирование нормы высева производится при помощи заслонки путем перемещения ее валиком и изменением частоты вращения приводного вала.

Механический высевач, разработанный учеными Курской ГСХА имени И. И. Иванова (рис. 2), состоит из корпуса 3 и расположенных в нем бункера для семян 1, вертикального высевача диска 2, ролика-отражателя 6, ограничителя семян 5, регулятора

глубины ячейки высевача диска 4, пружинного выталкивателя 7 [12].

Семенной материал поступает в бункер и равномерно распределяется в ячейках диска 2. Семена с чуть большими габаритами роликом-отражателем 6 погружаются в ячейку, изгибая подпружиненную часть регулятора. В результате глубина ячейки увеличивается, а семя поступает в высевное окно, где выбрасывается пружинным выталкивателем.

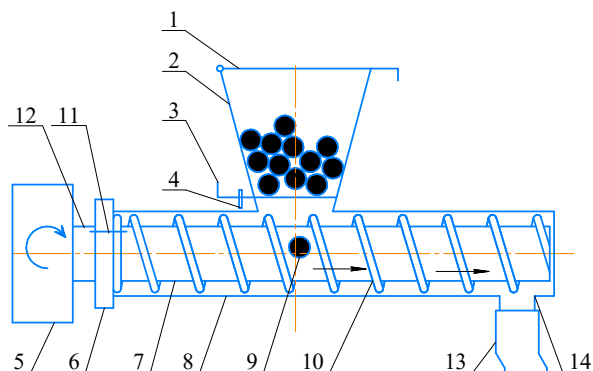
Преимуществом данной конструкции является снижение ускорения полета семени, что повышает качество посева семян. Недостаток проявляется в виде микротравмирования в момент схода семени с пружины происходит его.



Р и с. 2. Механический высевачный аппарат
F i g. 2. Mechanical seed-sowing device

Для осуществления точного высева семян зерновых культур в стенах Ульяновской ГСХА спроектирован спирально-винтовой высевач (рис. 3) [13].

Использование спирально-винтового рабочего органа позволяет добиться равномерного распределения семенного материала между витками спирали в высеваче с последующим равномерным высевом их в почву [14].



Р и с. 3. Спирально-винтовой высевальной аппарат: 1 – крышка; 2 – загрузочный бункер; 3 – дозатор; 4 – фиксатор; 5 – приводное устройство; 6 – диск; 7 – внутренняя трубка; 8 – корпус; 9 – семенной материал; 10 – рабочий орган; 11 – болтовое соединение; 12 – вал; 13 – гибкая трубка; 14 – выходное окно

F i g. 3. Spiral-screw seed-sowing device: 1 – lid; 2 – loading hopper; 3 – dispenser; 4 – retainer; 5 – drive device; 6 – disc; 7 – inner tube; 8 – case; 9 – seed material; 10 – working body; 11 – bolted connection; 12 – shaft; 13 – flexible tube; 14 – exit window

Однако при функционировании такого высевального аппарата происходит притормаживание рабочего органа и, как следствие, защемление семян между внутренней поверхностью корпуса, рабочим органом и внутренней трубкой. Это приводит к травмированию семенного материала. Кроме того, конструкция аппарата мало пригодна для точного посева семян с заданным шагом и доставки их в почву.

Помимо вышеуказанных высевальных аппаратов существует множество других технических решений, позволяющих выполнять посев семян зерновых культур, имеющих свои преимущества и недостатки [15–17]. Анализируя все многообразие конструкций, а также практические наблюдения, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным и широкоприменимым является механический высевальной аппарат катушечного типа.

Материалы и методы

Выполненный выше анализ технических решений показывает, что устройства для посева зерновых культур оснащены

разнообразными высевальными аппаратами, отличающимися по конструктивному исполнению каждого, возникает необходимость определения параметров, характеризующих их работу, а именно производительности при посеве различных сельскохозяйственных культур [18].

Равномерность нормы посева и точная глубина заделки семян – главные показатели качества работы посевных агрегатов. Указанные достоинства обеспечиваются за счет применения в их конструкциях механического высевального аппарата катушечного типа (рис. 4). Он состоит из двух частей, каждая из которых представляет собой зубчатую поверхность. Поверхность с мелким зубом предназначена для посева мелкозерновых культур, поверхность с крупным зубом – для посева зерновых и зернобобовых культур.

Наиболее популярным и повсеместно применимым посевным агрегатом с данным типом высевального аппарата является универсальная блочно-модульная сеялка СУБМ-3,6⁷.

⁷ Сеялка зерновая СУБМ-3,6 (СУБМ-3,6 с туком) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oaomam.ru/catalog/item30.html> (дата обращения: 10.01.2023).

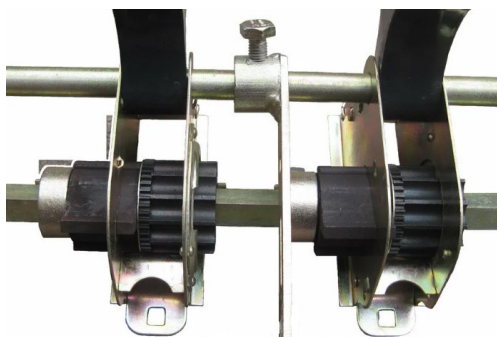


Рис. 4. Высевающий аппарат сеялки СУБМ-3,6

Fig. 4. Seed-sowing device of the seeder SUBM-3.6

Конструкция сеялки в общем виде (рис. 5) представляет собой гидравлическую систему 1, раму со сницей 2, на которой смонтирован пружинно-гидравлический механизм сошниковой группы 6, маркеры с гидравлическим приводом 3, зерновой и туковый высевающие аппараты с бункерами 4, механизм привода зернового и тукового высевающих аппаратов 5, рама 7 с опорными колесами 8, приводное колесо 9 с механизмом привода, механизм подъема сошников 10, механизм управления опорными колесами 11, трубопроводы гидравлической системы сеялки 1 и опорная стойка 12 [19]⁸.

Как было отмечено выше, одной из главных характеристик работы высевающих аппаратов – их производительность. В зависимости от нее определяется норма внесения посевного материала и режимы работы аппаратов. Поэтому исследования, направленные на установление регрессионных уравнений, характеризующих

производительность высевающего аппарата в зависимости от кинематических и конструктивных параметров его рабочих элементов, а именно частоты вращения n_k (мин⁻¹) и длины вылета l_k (мм) катушки, являются актуальными.

Результаты исследования

Для решения сформулированной проблемы на основе современных методов планирования эксперимента⁹ были разработаны экспериментальный стенд¹⁰ и методика проведения экспериментальных исследований производительности высевающего аппарата¹¹.

Уравнением регрессии производительности катушки является полином 2-го порядка:

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_1 + B_{12}x_1x_2 + B_{11}x_1^2 + B_{22}x_2^2,$$

где $B_0, B_1, B_2, B_{12}, B_{11}$ и B_{22} – постоянные коэффициенты уравнения регрессии; x_1 и x_2 – варьируемые факторы.

Частоты вращения катушки зернового высевающего аппарата лежит в интервале от 10 до 60 мин⁻¹. Минимальное значение интервала длины вылета катушки – 2 мм, а максимальное – 35 мм. Следовательно, l_k лежит в пределах от 2 до 35 мм.

Координаты центра плана: $n_k = 25$ мин⁻¹ и $l_k = 18,5$ мм.

Выбранные интервалы позволяют определить основные уровни факторов (табл. 1), для чего были использованы стандартные рекомендации $\Delta X_i = 0,3...0,45(X_{\max} - X_{\min})$.

⁸ Повышение эффективности функционирования зерновой сеялки СУБМ-3,6 / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-летию кафедры технической механики конструирования машин. п. Майский, 2018. С. 107–111. EDN: YOIJVL

⁹ Ящерицын П. И., Махаринский Е. И. Планирование эксперимента в машиностроении. Минск : Вышшая Школа, 1985. 286 с.

¹⁰ Экспериментальный стенд и методика проведения исследований работы зернового высевающего аппарата зернотуковой сеялки СУБМ-3,6 / Н. И. Наумкин [и др.] // Сельскохозяйственная наука Республики Мордовия: достижения, направления развития : материалы всерос. науч.-практ. конф. в 2 т. Т. 2. Саранск : Красный Октябрь, 2005. С. 374–381. EDN: IKBTPJ

¹¹ Методика проведения испытаний катушечного высевающего аппарата зерновой сеялки / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Журнал E-SCIO. 2019. № 11. С. 435–441. EDN: OMNYDD



Р и с. 5. Общий вид сеялки СУБМ-3,6
F i g. 5. General view of the seeder SUBM-3.6

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Уровни и интервалы варьирования факторов
Levels and intervals of variation of factors

Факторы / Factors	(ΔX_i)	(α_i)	Уровни факторов / Factor levels				
			0	+1	-1	-1,414	+1,414
$n_k (X_1)$	10,00	15,00	25,00	35,00	15,00	10,00	40,00
$l_k (X_2)$	10,00	16,50	18,50	28,50	8,50	2,00	35,00

Эксперименты реализовались сериями, количество которых с учетом вероятности ошибки $\alpha = 0,05$ и надежности результатов не менее 90 % принималось равным $m = 9$.

Для получения математической модели зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки

Agricultural engineering

получены опытные данные, которые были подвергнуты проверке воспроизводимости эксперимента, значимости коэффициентов регрессии и адекватности уравнений регрессии, а также вычислению оценок коэффициентов регрессии.

Проверка гипотезы об однородности выборочных дисперсией S_j^2 :

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \left(y_{jk} - \bar{y}_j \right)^2,$$

где m – объем выборки; k – число точек плана; y_{jk} – результаты наблюдений; \bar{y}_j – среднее арифметическое значение случайной величины.

Для проверки гипотезы об однородности оценок S_j^2 дисперсий применяется критерий Кохрена:

$$G_{ЭМ} = \frac{\max \{ S_j^2 \}}{\sum_{i=1}^N S_i^2 \{ y_i \}},$$

где $\max \{ S_i^2 \}$ – максимальное значение дисперсии; $\sum_{i=1}^N S_i^2 \{ y_i \}$ – сумма дисперсий.

Расчетные значения критерия Кохрена представлены в таблице 2.

Критическое значение $G_{кр}$ для числа степеней свободы, равных 8, числа опытов – 9, при уровне значимости 0,05 составляет 0,3522, тогда для всех случаев

$$G_{Эк} < G_{кр}.$$

Всю группу S_i^2 можно считать оценками для одной и той же дисперсии воспроизводимости эксперимента и определить как

$$S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 \{ y_i \}.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Коэффициенты уравнения регрессии определялись по известным формулам.

$$B_0 = \frac{A}{N} \left[2\lambda^2 (k+2) \sum_{i=1}^N y_i - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N X_{ij}^2 \bar{y}_i \right].$$

$$B_1 = \frac{C}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i} \bar{y}_i;$$

$$B_2 = \frac{C}{N} \sum_{i=1}^N X_{2i} \bar{y}_i.$$

$$B = \frac{A}{N} \left\{ C^2 [(k+2)\lambda - k] \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i + C(1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_i - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j \right\}.$$

$$B_{12} = \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{i=1}^N x_{1i} y_{2i} \bar{y}_i,$$

где $A = \frac{1}{2\lambda [(k+2)\lambda - k]}$; $C = \frac{N}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2}$;

$$\lambda = \frac{kN}{(k+2)(N-n_0)},$$

N – число опытов; k – количество факторов; n_0 – число опытов в центре плана; \bar{y}_i – значение функции отклика в i -ом опыте; i – номер опыта; j – номер фактора; x_{ij} – элементы соответствующего столбца матрицы планирования (табл. 3).

Проверка значимости коэффициентов заключалась в определении оценки дисперсий по формулам:

$$S^2 \{ B_0 \} = \frac{2A\lambda^2 (k+2)}{Nm} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \};$$

$$S^2 \{ B_i \} = \frac{C}{Nm} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \};$$

$$S^2 \{ B_{ij} \} = \frac{C^2}{Nm\lambda} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \};$$

$$S^2 \{ B_{ii} \} = \frac{AC^2 [(k+1)\lambda - (k-1)]}{Nm} S_{\text{вос}}^2 \{ y_i \},$$

где m – число параллельных опытов в точках плана.

Для каждого коэффициента подсчитывалось значение критерия $t_i = |B_i| / S^2 \{ B_i \}$, и сравнивалось с критическим $t_{кр}$. Результаты проверки приведены в таблице 3, откуда следует, что все коэффициенты уравнений регрессии значимы, и математические модели имеют вид:

Расчетные значения критерия Кохрена
Calculated values of the Cochren criterion

Параметр / Parameter	Культура / Culture					
	Пшеница / Wheat	Рожь / Rye	Ячмень / Barley	Овес / Oats	Просо / Millet	Вика / Vetch
$\max\{S_i^2\}$	3,20	2,40	2,80	2,65	4,22	4,98
$\sum_{i=1}^N S_i^2\{y_i\}$	10,90	10,60	10,24	15,30	14,30	23,70
$G_{эж}$	0,29	0,23	0,27	0,17	0,29	0,21
$S_{\text{вос}}^2\{y_i\}$	1,21	1,28	1,13	1,70	1,59	2,63

– для пшеницы:

$$Y = 85,42 + 41,08x_1 + 19,33x_2 + 17,88x_1x_2 + 7,72x_1^2 + 5,62x_2^2;$$

– для ржи:

$$Y = 106,22 + 51,77x_1 + 26,95x_2 + 27,7x_1x_2 + 9,53x_1^2 - 4,39x_2^2;$$

– для ячменя:

$$Y = 58,02 + 37,06x_1 + 19,84x_2 + 21,28x_1x_2 + 14,14x_1^2 + 14,21x_2^2;$$

– для овса:

$$Y = 101,82 + 27,39x_1 + 17,07x_2 + 17,88x_1x_2 - 12,92x_1^2 - 17,6x_2^2;$$

– для проса:

$$Y = 63,12 + 31,95x_1 + 21,85x_2 + 19,05x_1x_2 + 3,77x_1^2 - 12,87x_2^2;$$

– для вики:

$$Y = 85,22 + 46,02x_1 + 34,75x_2 + 33,23x_1x_2 + 13,05x_1^2 - 9,6x_2^2.$$

Адекватность проверялась с помощью критерия Фишера (F -критерия):

$$F_p = \frac{S_{\text{Ад}}^2\{y_1\}}{S_{\text{Вос}}^2\{y_i\}},$$

где $\frac{1}{S_{\text{Вос}}^2\{y_i\}}$ – дисперсия воспроизводимости; $\frac{S_{\text{Ад}}^2\{y_1\}}{1}$ – дисперсия адекватности.

Дисперсия $\frac{1}{S_{\text{Вос}}^2\{y_0\}}$ определялась по формуле:

Agricultural engineering

$$S_{\text{Вос}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{ou} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}$$

Дисперсия $S_{\text{Ад}}^2\{y\}$ определялась по формуле:

$$S_{\text{Ад}}^2\{y\} = \frac{S_R - S_E}{f},$$

где $f = N - k' - (n_0 - 1)$; k' – число статистически значимых коэффициентов регрессии.

$$S_R = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{ip} - y_{iэ})^2,$$

где y_{ip} – расчетные значения функции отклика в точках плана; $y_{iэ}$ – экспериментальные значения;

$$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{uo} - \bar{y}_0)^2.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 4, откуда следует, что модели адекватны, так как расчетные значения F_p -критерия меньше табличного F_T .

После перехода от кодированных значений к натуральным значениям факторов математические модели могут быть представлены в следующем виде:

Таблица 3
Table 3

Проверка значимости коэффициентов регрессии зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки
Checking the significance of the regression coefficients of the seeding rate dependence on the rotation speed and the roller operating length

Культура / Culture	Коэффициент / Ratio	Значения / Values		$S^2\{b_{ij}\}$	t_1	$t_{кр}$	Выводы / Conclusions
Пшеница / Wheat	B_0	Оценка коэффициентов регрессии / Estimation of regression coefficients	85,42	Проверка значимости коэффициентов регрессии / Checking the significance of regression coefficients	0,027	520	$t > t_{кр}$
	B_1		41,08		0,017	315	$t > t_{кр}$
	B_2		19,33		0,017	148	$t > t_{кр}$
	B_{12}		17,88		0,034	97	$t > t_{кр}$
	B_{11}		7,72		0,019	53	$t > t_{кр}$
	B_{22}		5,62		0,019	41	$t > t_{кр}$
Рожь / Rye	B_0		106,22		0,028	634	$t > t_{кр}$
	B_1		51,77		0,018	385	$t > t_{кр}$
	B_2		26,95		0,018	200	$t > t_{кр}$
	B_{12}		27,7		0,036	145	$t > t_{кр}$
	B_{11}		9,53		0,020	67	$t > t_{кр}$
	B_{22}		-4,39		0,020	31	$t > t_{кр}$
Ячмень / Barley	B_0		58,02		0,025	366	$t > t_{кр}$
	B_1		37,06		0,016	292	$t > t_{кр}$
	B_2		19,84		0,016	156	$t > t_{кр}$
	B_{12}		21,28		0,032	118	$t > t_{кр}$
	B_{11}		14,14		0,018	105	$t > t_{кр}$
	B_{22}		14,21		0,018	106	$t > t_{кр}$
Овес / Oats	B_0	101,82	0,037	529	$t > t_{кр}$		
	B_1	27,39	0,024	176	$t > t_{кр}$		
	B_2	17,07	0,024	110	$t > t_{кр}$		
	B_{12}	17,88	0,048	81	$t > t_{кр}$		
	B_{11}	-12,92	0,027	78,6	$t > t_{кр}$		
	B_{22}	-17,6	0,027	107,1	$t > t_{кр}$		
Просо / Millet	B_0	63,12	0,035	337	$t > t_{кр}$		
	B_1	31,95	0,022	215,4	$t > t_{кр}$		
	B_2	21,85	0,022	147	$t > t_{кр}$		
	B_{12}	19,05	0,044	90,8	$t > t_{кр}$		
	B_{11}	3,77	0,025	36	$t > t_{кр}$		
	B_{22}	-12,87	0,025	81	$t > t_{кр}$		
Вика / Vetch	B_0	85,22	0,058	353	$t > t_{кр}$		
	B_1	46,02	0,037	75	$t > t_{кр}$		
	B_2	34,75	0,037	180	$t > t_{кр}$		
	B_{12}	33,23	0,074	449	$t > t_{кр}$		
	B_{11}	13,05	0,042	63	$t > t_{кр}$		
	B_{22}	-9,60	0,042	46	$t > t_{кр}$		
	$N = 13$	$k = 2$	$n_0 = 5$	$m = 9$	$A = 0,498$	$C = 1,625$	$\lambda = 0,81$

При $v_{34} = 13 (9 - 1) = 104, t_{кр} = 1,98$

Проверка адекватности математической модели зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки
Verification of the adequacy of the mathematical model of the seeding rate dependence on the rotation speed and the roller operating length

Культура / Culture	Параметры / Parameter						
	$S_{\text{Вос}}^2$	S_R	S_E	f	$S_{\text{Ад}}^2$	F_P	F_T
Пшеница / Wheat	1,94	16,90	15,50		0,47	0,24	
Рожь / Rye	2,20	20,60	17,60		1,00	2,20	
Ячмень / Barley	0,90	8,30	7,20	3	0,37	0,41	6,10
Овес / Oats	2,65	24,10	21,20		0,97	0,37	
Просо / Millet	4,22	37,20	33,70		1,17	2,76	
Вика / Vetch	2,46	21,50	19,70		0,60	0,24	

– для пшеницы:

$$W_{\text{га}} = 97,2 - 3,1n_{\text{к}} - 4,7l_{\text{к}} + 0,18n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,08n_{\text{к}}^2 + 0,06l_{\text{к}}^2;$$

– для ржи:

$$W_{\text{га}} = 100 - 4,75n_{\text{к}} - 5l_{\text{к}} + 0,28n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,1n_{\text{к}}^2 + 0,04l_{\text{к}}^2;$$

– для ячменя:

$$W_{\text{га}} = 69,6 - 7,3n_{\text{к}} - 8,52l_{\text{к}} + 0,2n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,14n_{\text{к}}^2 + 0,14l_{\text{к}}^2;$$

– для овса:

$$W_{\text{га}} = -56,5 + 5,9n_{\text{к}} + 3,74l_{\text{к}} + 0,18n_{\text{к}}l_{\text{к}} - 0,13n_{\text{к}}^2 - 0,17l_{\text{к}}^2;$$

– для проса:

$$W_{\text{га}} = 10,4 - 2,2n_{\text{к}} + 2,19l_{\text{к}} + 0,19n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,04n_{\text{к}}^2 - 0,13l_{\text{к}}^2;$$

– для вики:

$$W_{\text{га}} = 110 - 8n_{\text{к}} + 1,25l_{\text{к}} + 0,33n_{\text{к}}l_{\text{к}} + 0,130n_{\text{к}}^2 - 0,1l_{\text{к}}^2.$$

На рисунках 6–11 модели изображены в факторном пространстве с осями координат $W_{\text{га}}$, $n_{\text{к}}$ и $l_{\text{к}}$.

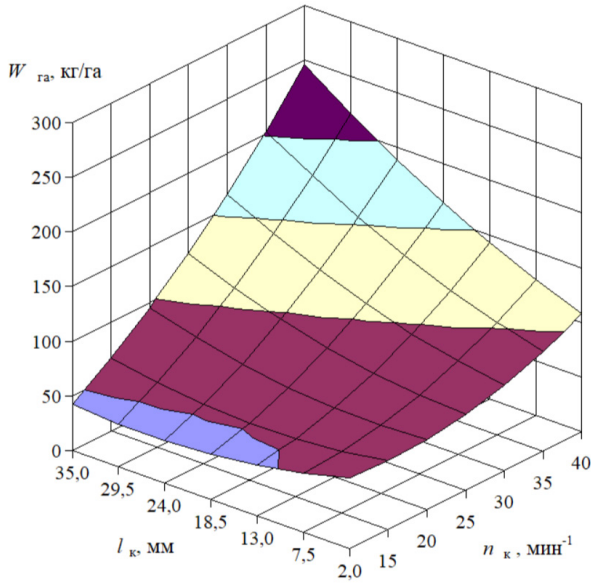
Обсуждение и заключение

Для стабильно высокой урожайности зерновых культур растениям необходимо получить достаточный объем питательных веществ, зависящий от площади питания, которая обусловлена заданной нормой высева, обеспечивающейся высевающим аппаратом.

В большинстве случаев в посевных агрегатах, например зерновой сеялки СУБМ-3,6, используются механические высевающие аппараты и в частности механический высевающий аппарат катушечного типа.

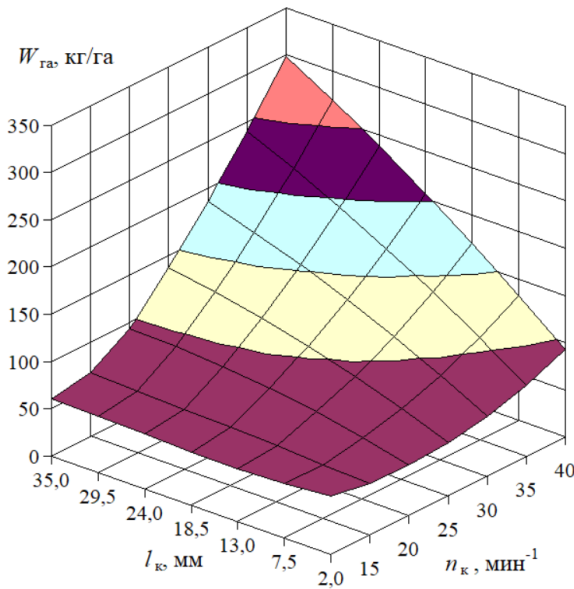
Главной характеристикой работы данного аппарата является производительность. Разработанный экспериментальный стенд и методика проведения экспериментальных исследований позволили построить математические модели зависимости производительности высевающего аппарата от частоты вращения приводного вала рабочих органов (катушек) $n_{\text{к}}$ (мин^{-1}) и длины вылета катушек $l_{\text{к}}$ (мм), в определенных областях действия частоты вращения катушки – от 10 до 60 мин^{-1} и длины вылета катушки от 2 мм до 35 мм.

Полученные в результате экспериментальных исследований аналитические зависимости нормы высева от частоты вращения и длины вылета катушки позволят наиболее эффективно использовать работу высевающих зерновых катушечных аппаратов, что в свою очередь окажет влияние на выбор оптимальных режимов функционирования сеялки СУБМ-3,6.



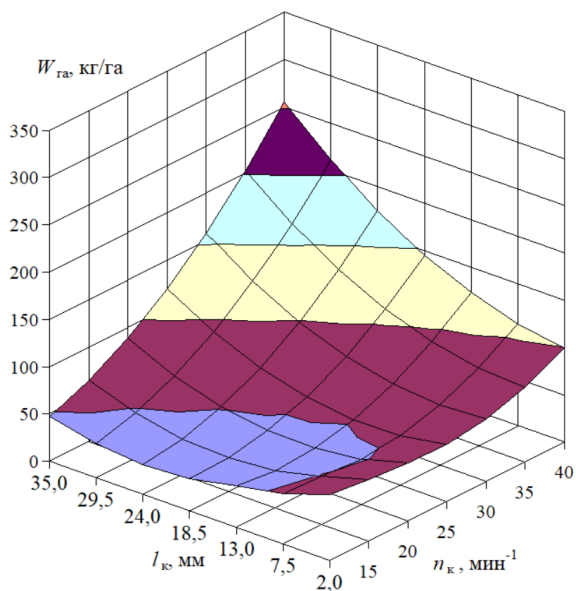
Р и с. 6. Модель зависимости нормы высева пшеницы катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

F i g. 6. Model of the dependence of the rates of seeding wheat by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length

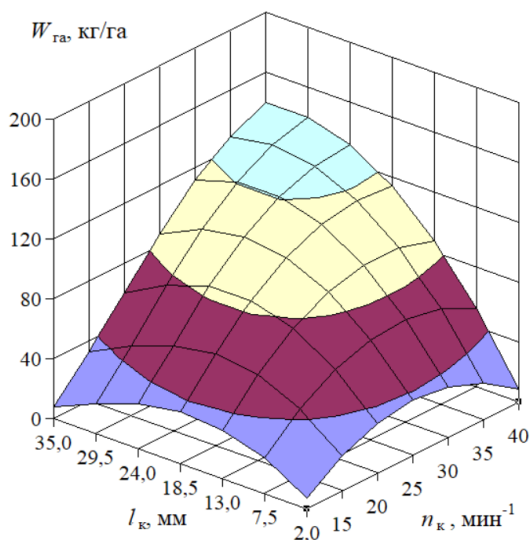


Р и с. 7. Модель зависимости нормы высева ржи катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

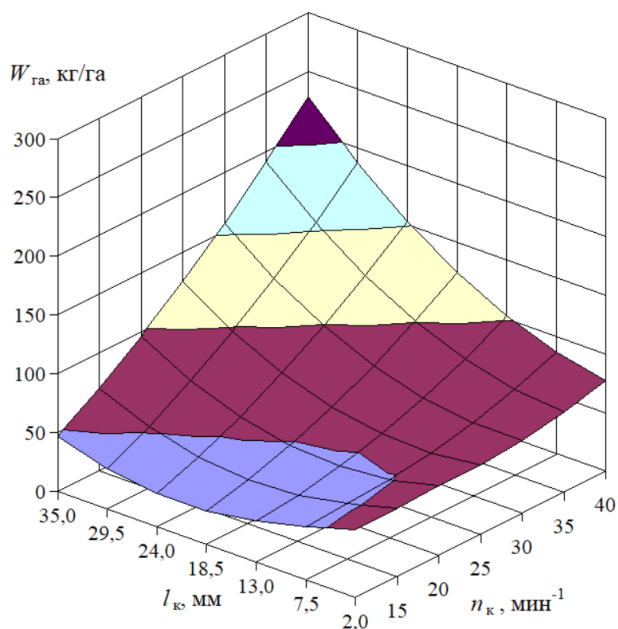
F i g. 7. Model of the dependence of the rates of seeding rye by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length



Р и с. 8. Модель зависимости нормы высева ячменя катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки
 F i g. 8. Model of the dependence of the rates of seeding barley by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length

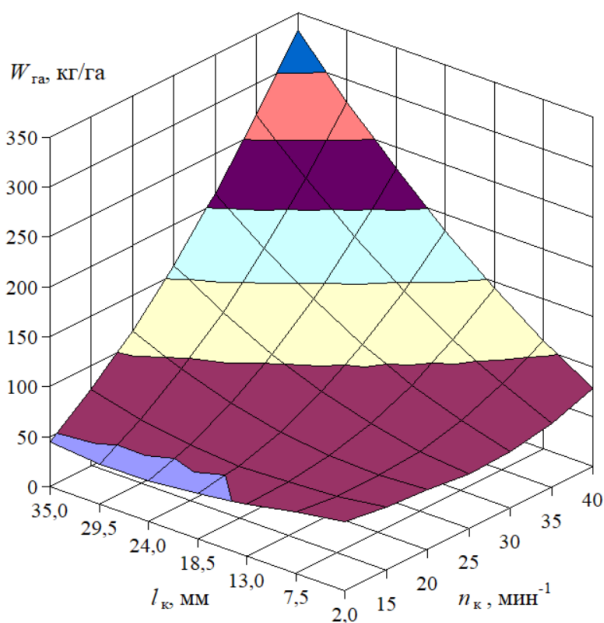


Р и с. 9. Модель зависимости нормы высева овса катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки
 F i g. 9. Model of the dependence of the rates of seeding oat by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length



Р и с. 10. Модель зависимости нормы высева проса катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

Fig. 10. Model of the dependence of the rates of seeding millet by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length



Р и с. 11. Модель зависимости нормы высева вики катушечным аппаратом от частоты вращения и длины вылета катушки

Fig. 11. Model of the dependence of the rates of seeding vetch by the roller feed unit on the rotation frequency and the roller operating length

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопьев М. Г. Продовольственная безопасность: анализ проекта доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации (часть II) // Региональные проблемы преобразования экономики. 2018. № 10. С. 7–12. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2018-10-7-12>
2. Гатаулина Е. А. Оценка структурных изменений в посевах зерновых и зернобобовых культур по материалам Всероссийской сельскохозяйственной переписи // Московский экономический журнал. 2017. № 4. С. 71. EDN: ZWIMRF
3. Solodun V. I., Amakova T. V. Efficiency of Direct Sowing Technology for Grain Crops Depending on the Predecessors and Backgrounds of the Main Tillage // Journal of Bio-Sciences. 2020. Vol. 101. P. 76–81. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-101-76-81>
4. Методические подходы к прогнозированию научно-технологического развития отрасли растениеводства / Е. В. Рудой [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31, № 10. С. 8–17. EDN: YMENBW
5. Джабаров Т. Д. Особенности роста и развития зерновых колосовых культур в зависимости от способов посева // Кишоварз. 2018. № 4. С. 11–13. EDN: XRBFI
6. A Solid Fertilizer and Seed Application Rate Measuring System for a Seed-fertilizer Drill Machine / Yu. Hongfeng [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 162. P. 836–844. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.007>
7. Delayed Sowing Increases Grain Number by Enhancing Spike Competition Capacity for Assimilates in Winter Wheat / Z. Yuangang [et al.] // European Journal of Agronomy. 2019. Vol. 104. P. 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.006>
8. Раднаев Д. Н., Зимина О. Г. Обоснование рациональных параметров сошника для посева зерновых культур с внесением удобрений ниже уровня семян // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 3 (59). С. 106–115. <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-3-106-115>
9. Design of Automatic Seed Sowing Machine for Agriculture Sector / K. Ratnesh [et al.] // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 63. P. 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.188>
10. Припоров Е. В., Припоров И. В. Анализ зерновых сеялок для посева по традиционной технологии // Известия Оренбургского ГАУ. 2018. № 3 (71). С. 129–131. EDN: XRTRLV
11. Катущечный высевающий аппарат : патент 178778 Российская Федерация / Саков А. П. [и др.]. № 2017102130 ; заявл. 23.01.2017 ; опубл. 19.04.2018. Бюл. № 11. 5 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU178778U1_20180419.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
12. Механический высевающий аппарат : патент 162198 Российская Федерация / Шварц А. А., Овчаров А. А., Шварц С. А. № 2015155789/13 ; заявл. 24.12.2015 ; опубл. 27.05.2015. Бюл. № 15. 8 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2474103C1_20130210.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
13. Высевающий аппарат : патент 2502252 Российская Федерация / Исаев Ю. М., Семашкин Н. М., Назарова Н. Н. № 2012121862/13 ; заявл. 25.05.2012 ; опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36. 5 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2502252C1_20131227.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
14. Исаев Ю. М., Семашкин Н. М., Злобин В. А. Высев семян спирально-винтовым аппаратом // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 8–3. С. 75–76. URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=5944> (дата обращения: 21.12.2022).
15. Высевающий аппарат : патент 2556722 Российская Федерация / Балашов А. В., Белогорский В. П., Зайнушев Ж. Ж. № 2014121410/13 ; заявл. 27.05.2014 ; опубл. 20.07.2015. Бюл. № 20. 8 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37434565_66560037.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
16. Высевающий аппарат сеялки : патент 88245 Российская Федерация / Мамедов Ф. А., Денисов В. Н., Курилин С. П. № 2008111102/22 ; заявл. 25.03.2008 ; опубл. 10.11.2009. 15 с. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38452825_95455453.pdf (дата обращения: 21.12.2022).
17. Макаренко А. Н., Мачкарин А. В., Рыжков А. В. Оптимизация высевающего аппарата для прямого посева // Сельский механизатор. 2014. № 12. С. 8–9. URL: <http://selmech.msk.ru/1214.html> (дата обращения: 21.12.2022).

18. Булавинцев Р. А. Анализ конструкций высевających аппаратов для высева зерновых культур // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 2 (19). С. 74–84. EDN: XSJSOL

19. Результаты экспериментальных исследований работы туковысевающего аппарата и их практическое использование в работе сеялки СУБМ-3,6 / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Техника и оборудование для села. 2020. № 12 (282). С. 20–24. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-12-20-24>

Поступила 06.03.2023; одобрена после рецензирования 27.04.2023; принята к публикации 15.05.2023.

Об авторах:

Купряшкин Владимир Федорович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, kupwf@mail.ru

Наумкин Николай Иванович, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, ResearcherID: L-4643-2018, naumn@yandex.ru

Уланов Александр Сергеевич, 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. Большевицкая, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Безруков Анатолий Владимирович, 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. Большевицкая, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8511-2743>, Researcher ID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Комолов Артем Денисович, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0290-1553>, Researcher ID: IAQ-9674-2023, komoartyom@yandex.ru

Антипов Юрий Анатольевич, магистрант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9147-7691>, antipovya@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, доработка текста.

Н. И. Наумкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов.

А. С. Уланов – проведение лабораторных исследований, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста, визуализация и редактирование.

А. В. Безруков – проведение лабораторных исследований, визуализация текста, обработка результатов теоретических исследований.

А. Д. Комолов – литературный и патентный анализ.

Ю. А. Антипов – анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Prokopiev M.G. Food Security: Analysis of a Draft of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation (Part II). *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2018;(10):7–12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2018-10-7-12>
2. Gataulina E.A. Evaluation of Structural Changes in Sown Areas under Cereals on Materials of All-Russian Agricultural Censuses. *Moscow Economic Journal*. 2017;(4):102. Available at: <https://qje.su/wp-content/uploads/2022/04/Nomer-4-2017.pdf> (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
3. Solodun V.I., Amakova T.V. [Efficiency of Direct Sowing Technology for Grain Crops Depending on the Precursors and Backgrounds of the Main Tillage]. *Journal of Bio-Sciences*. 2020;101:76–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2020-101-76-81>
4. Rudoy E.V., Ryumkin S.V., Petukhova M.S., Andronov A.Yu., Bykova S.L., Potseluev O.M., et al. Methodological Approaches to Forecasting Scientific and Technological Development of the Crop Industry. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*. 2017;31(10):8–17. (In Russ.)
5. Jaborov T.D. Increase a Have Grand and Underground Biomass of Gracing Crops in Relation of Use of Organic and Mineral Fertilizers. *Kishovarz*. 2018;(4):11–13. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Hongfeng Yu., Yongqian D., Xiuqing F., Haitao L., Minfeng J., Chuanlei Y., et al. A Solid Fertilizer and Seed Application Rate Measuring System for a Seed-fertilizer Drill Machine. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;162:836–844. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.007>
7. Yuangang Z. Jinpeng C., Xinqlong D., Mingrong H. Delayed Sowing Increases Grain Number by Enhancing Spike Competition Capacity for Assimilates in Winter Wheat. *European Journal of Agronomy*. 2019;104:49–62. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.006>
8. Radnaev D.N., Zimina O.G. [Substantiation of Rational Parameters of a Coulter for Sowing Grain Crops with Fertilization Below the Seed Level]. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2021;(3):106–115. (In Russ.)
9. Ratnesh K., Aadhar G., Parth D., Shubh G., Saurabh D. Design of Automatic Seed Sowing Machine for Agriculture Sector. *Materials Today: Proceedings*. 2022;63:341–346. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.188>
10. Priporov E.V., Priporov I.V. [Analysis of Grain Seeders for Sowing by Traditional Technology]. *Izvestiya Orenburg GAU*. 2018;(3):129–131. (In Russ.)
11. Sakov A.P., Korchenkina N.A., Bogomolova Yu.A., Kistanov E.I., Oshurkov M.V. [Coil Seeding Machine]. Patent 178,778 Russian Federation. 2018 April 19. 5 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU178778U1_20180419.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
12. Schwartz A.A., Ovcharov A.A., Schwartz S.A. [Mechanical Seeding Apparatus]. Patent 162,198 Russian Federation. 2015 May 27. 8 p. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2474103C1_20130210.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
13. Isaev Yu.M., Semashkin N.M., Nazarova N.N. [Seeding Apparatus]. Patent 2,502,252 Russian Federation. 2013 December 27. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2502252C1_20131227.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
14. Isaev Yu.M., Semashkin N.M., Zlobin V.A. [Sowing Seeds with a Spiral-Screw Apparatus]. *International Journal of Experimental Education*. 2014;(8–3):75–76. Available at: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=5944> (In Russ.)
15. Balashov A.V., Belogorsky V.P., Zainushev Zh.Zh. [Seeding Apparatus]. Patent 2,556,722 Russian Federation. 2015 July 20. 8 p. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37434565_66560037.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
16. Mammadov F.A., Denisov V.N., Kurilin S.P. [Seeding Seeder Apparatus]. Patent 88,245 Russian Federation. 2009 November 10. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38452825_95455453.pdf (accessed 21.12.2022). (In Russ.)
17. Makarenko A.N., Machkarin A.V., Ryzhkov A.V. Optimization of the Seeding Apparatus for Direct Sowing [Vibrating Seeding Apparatus for Sowing Winter Wheat Seeds]. *Rural Mechanizer*. 2014;(12):8–9. Available at: <http://selmech.msk.ru/1214.html> (accessed 21.12.2022). (In Russ.)

18. Bulavintsev R.A. Analysis of the Designs of Sowing Machines for Sowing Grain Crops. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2018;(2):74–84. (In Russ., abstract in Eng.)
19. Kupryashkin V.F. Glotov S.V., Ulanov A.S. Shlyapnikov M.G., Gusev A.Yu. The Results of Experimental Studies of the Operation of the Fertilizer Apparatus and their Practical Use in the Work of the Seeder SUBM-3,6. *Machinery and Equipment for the Village*. 2020;(12):20–24. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-12-20-24>

Submitted 06.03.2023; revised 27.04.2023; accepted 15.05.2023.

About the authors:

Vladimir F. Kupryashkin, Cand.Sci. (Engr.), Head 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/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, kupwf@mail.ru

Nikolay I. Naumkin, Dr.Sci. (Ped.), Cand.Sci. (Engr.), 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/0000-0002-1109-5370>, Researcher ID: L-4643-2018, naumn@yandex.ru

Aleksandr S. Ulanov, 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/0000-0001-6041-6911>, Researcher ID: L-4662-2018, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

Anatoliy V. Bezrukov, 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/0000-0002-8511-2743>, Researcher ID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Artem D. Komolov, Postgraduate Student 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/0009-0001-0290-1553>, Researcher ID: IAQ-9674-2023, komoartyom@yandex.ru

Yuriy A. Antipov, Master's Student 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/0009-0009-9147-7691>, antipovya@yandex.ru

Authors contribution:

V. F. Kupryashkin – scientific guidance, formulation of the main concept of the study, formation of conclusions, revision of the text.

N. I. Naumkin – formulation of the research basic concept, formulation of conclusions.

A. S. Ulanov – laboratory research, processing experimental results, preparing the initial version of the text, visualization and editing.

A. V. Bezrukov – laboratory research, text visualization, processing the theoretical research results.

A. D. Komolov – literary and patent analysis.

Yu. A. Antipov – analyzing the literature.

All authors have read and approved the final manuscript.



Теоретическое обоснование основных параметров аксиальных устройств для вытирания семян трав

М. В. Симонов¹, С. А. Плотников¹, В. Ю. Мокиев²✉

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

² Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого (г. Киров, Российская Федерация)

✉ dizel154@bk.ru

Аннотация

Введение. Проведя обзор литературных источников, нами установлено, что на данный момент не существует достоверных методик, позволяющих теоретически определять основные параметры аксиальных устройств для вытирания семян трав и нужно провести исследования для установления математической взаимосвязи между ними и показателями качества.

Цель статьи. Теоретически обосновать зависимость основных параметров аксиальных вытирающих устройств семян трав от требований по качеству получения семян трав посредством вытирания.

Материалы и методы. Совокупность заранее известных сведений по работе аксиальных вытирающих устройств с барабаном, с установленными на нем бичами, обзор работ авторов и собственные наблюдения рабочего процесса клеверотерки К-0,3 позволили установить основные предпосылки, на основе которых построен алгоритм решения поставленной задачи.

Результаты исследования. В результате теоретического рассмотрения движения частиц материала в рабочем пространстве барабанно-декового аксиально-роторного вытирающего устройства получена система математических уравнений. Решение полученной системы уравнений позволяет определить среднее значение скорости движения частиц в осевом направлении и количество воздействий, наносимых по ним бичами в процессе перемещения. Получено выражение, связывающее степень вытирания семян и основные параметры устройства: длину, количество бичей и направление их рифов, частоту вращения барабана.

Обсуждение и заключение. Выявлено, что один из главных показателей, такой как степень вытирания, имеет зависимость от длины рабочих органов устройств и от количества и направления установленных бичей на барабан. Полученные в результате исследования теоретические зависимости позволяют определить основные параметры аксиальных устройств для вытирания семян.

Ключевые слова: клеверотерка, степень вытирания семян, устройство для вытирания семян трав, показатели качества, параметры

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Симонов М. В., Плотников С. А., Мокиев В. Ю. Теоретическое обоснование основных параметров аксиальных устройств для вытирания семян трав // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 339–355. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.339-355>

© Симонов М. В., Плотников С. А., Мокиев В. Ю., 2023



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

Theoretical Substantiation of the Main Parameters of Axial Devices for Threshing Grass Seeds

M. V. Simonov^a, S. A. Plotnikov^a, V. Yu. Mokiev^b✉

^a Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

^b Federal Agricultural Research Center of the North-East (Kirov, Russian Federation)

✉ dizel154@bk.ru

Abstract

Introduction. The review of literature sources has shown that at the moment there are no reliable methods, which theoretically determine the main parameters of axial devices for threshing grass seeds and it is necessary to conduct researches to establish a mathematical relationship between these parameters and quality indicators.

Aim of the Article. The article aim is theoretical substantiation of the dependence of the main parameters of axial devices for threshing grass seeds on the quality requirements to the technological process of threshing grass seeds.

Materials and Methods. A set of priori information about the operation of axial rasp-bar threshers, the analysis of literary sources and own observations of the working process of the clover thresher K-0.3 allowed determining the basic prerequisites to develop an algorithm for solving the task.

Results. As a result of theoretical consideration of the process of moving particles of the processed material in the working space of a drum-deck axial-rotor device for threshing grass seeds, a system of mathematical equations is obtained. The solution of the resulting system of equations makes it possible to determine the average axial velocity of the particles and a number of impacts inflicted by the rasps on them during movement. There is obtained an expression for linking the degree of seed threshing and main parameters of the device such as length, a number of rasps and the direction of their cleats, and the frequency of rotation of the drum.

Discussion and Conclusion. It was found that the degree of seed threshing significantly depends on both the length of the threshing device and a number of drum rasps and the direction of their cleats. The theoretical dependencies obtained as a result of the study make it possible to determine the main parameters of axial devices for threshing seeds, depending on the requirements imposed on the device.

Keywords: clover thresher, device for threshing grass seeds, degree of threshing seeds, quality indicators, parameters

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

For citation: Simonov M.V., Plotnikov S.A., Mokiev V.Yu. Theoretical Substantiation of the Main Parameters of Axial Devices for Threshing Grass Seeds. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):339–355. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.339-355>

Введение

Для получения семян трав в нашей стране и за рубежом применяются специальные технологии и машины, в том числе для вытирания семян из оболочек – клеверотерки.

Применение клеверотерок в соответствующей технологической схеме позволяет снизить потери семян при послеуборочной обработке в 2–5 раз и сократить их

повреждение на 20–30%. В связи с этим существует необходимость изучения технологического процесса клеверотерок и разработки новых конструкций основного узла этих машин – устройств для вытирания семян трав.

При проектировании предъявляются строгие агротехнологические требования к устройствам для вытирания семян трав. Данные устройства занимают

определенное место в технологии, в соответствующей технологической линии и обладают определенной производительностью. На данных признаках основывается выбор их технологической схемы, от которой зависит подбор и конструкция рабочих органов.

Для получения семян трав за счет процесса их вытирания в настоящее время наиболее распространены барабанно-дековые вытирающие устройства. В подобных устройствах аксиального типа воздействие на обрабатываемый материал можно охарактеризовать как перетирающее, а не ударное.

Особенностью аксиальных устройств является то, что материал при обработке движется в осевом направлении за счет установки под углом самих бичей или же их рифов. При этом материал, попадая в устройство через загрузочную горловину, сжимается и протирается по рабочей поверхности деки и выходит из загрузочной горловины. В аксиальных устройствах при обработке материал движется по винтовой линии.

Одним из главных показателей качества работы клеверотерок является степень ε вытирания семян. На настоящий

момент в литературе в полной мере не освещено математическое описание определения данного показателя применительно к аксиальным устройствам. Это, в свою очередь, создает трудности для обоснования основных кинематических и конструктивных параметров при проектировании вытирающих устройств.

Обзор литературы

Исследования процесса получения семян бобовых культур в вытирающих устройствах, имеющих в конструкции барабанно-дековые рабочие органы, изложены во многих теоретических работах¹ [1–4].

Изучение данных трудов показало, что теоретическое описание процесса движения материала при обработке сопровождается экспериментальными исследованиями, которые позволяют определить экспериментальные коэффициенты и поправки. За счет этих коэффициентов и поправок теоретическое описание становится наиболее точным, поэтому этот метод исследования вытирающих устройств и является основным для разработки методик инженерных расчетов при проектировании вытирающих устройств² [1; 5–7].

¹ Карелин И. И. Экспериментальные основы для создания клеверотерочной машины : дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1962. 168 с.; Кулагин М. С. Механизация процесса выделения семян клевера из пыжины в условиях увлажненной зоны : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1955. 18 с.; Ляуконис И. Т. Исследование процессов обмолота и сепарации при уборке семенников красного клевера комбайнами с получением пыжины в условиях Литовской ССР : дис. ... канд. техн. наук. Раудонварис (Литва), 1970. 201 с.; Микотин В. Я. Исследование технологического процесса вытирания семян клевера : дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1968. 265 с.; Пигалев А. К. Изыскание и исследование приспособления к зерноуборочному комбайну для уборки семенников многолетних трав : дис. ... канд. техн. наук. М., 1977. 174 с.; Филиппов А. И. Исследование технологического процесса уборки семенников трав, требующих вытирания семян : дис. ... канд. техн. наук. М., 1956. 146 с.

² Улахович Е. А. Обмолот семенного вороха клевера вальцовым аппаратом с эластичными рабочими поверхностями : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Горки, 1989. 23 с.; Янулевичус В. И. Исследование рабочего процесса клеверотерочных аппаратов при вытирании семян красного клевера : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Каунас (Литва), 1964. 27 с.; Корякин В. А. Влияние площади перфорированной поверхности деки вытирающего устройства на процесс вытирания семян // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : мат-лы II Всерос. науч.-практ. конф. Киров : Вят. ГСХА, 2008. Вып. 8. С. 109–110; Карпов Н. А., Кшникаткин С. А., Аленин П. Г. Разработка устройства для выделения семян из семенников-биотипов растений многолетних бобовых трав при селекционном отборе // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Т. IV. Пенза, 2021. С. 241–243. EDN: ZFLVPI; Обзор и анализ машин для обмолота и вытирания семян трав / Н. А. Карпов [и др.] // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : сб. материалов Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. молодых ученых. Т. 3. Пенза, 2020. С. 29–32. EDN: RINHOE

Еще необходимо указать, что разработанные методики можно применять лишь для устройств с определенной конструкцией рабочих органов, которые исследованы экспериментально.

Исследования доказывают, что низкая производительность и невысокие показатели работы вытирающих устройств семян трав являются следствием того, что технологический процесс их работы не соответствует состоянию и свойствам обрабатываемого материала³. В барабанно-дековых устройствах не допускается сгуживание и скапливание материала при его поступлении в рабочий зазор. Это является основным технологическим условием, соблюдение которого достигается за счет верного подбора основных параметров подающих материал устройств в рабочую зону.

При этом во время рабочего процесса между вытирающими поверхностями должна поддерживаться оптимальная толщина слоя материала для его защемления, сжатия и движения в вытирающем устройстве⁴ [8; 9].

Стабильное перемещение материала в зазоре между рабочими поверхностями барабанно-декового устройства обеспечивается за счет постоянного угла защемления во всех точках соприкосновения поверхности бича. При этом профиль рабочей поверхности бича может быть выполнен в виде логарифмической спирали⁵ [10], позволяющей сохранять необходимое условие для стабильного перемещения рабочего материала.

Для построения профиля бича Ю. Д. Ахламов и его соавторы приводят систему уравнений в своей работе⁶. Но к сожалению, у большинства стандартных бичей рабочая поверхность представляет собой сочетание пары дуг окружностей, что затрудняет применение предложенных уравнений.

Существует также понятие допустимой степени сжатия, которая равна отношению расстояния от деки до носка бича к зазору между рабочими поверхностями в клеверотерке.

В ходе экспериментальных исследований установлено значение $K = 1,85 \dots 1,96$ ⁷. Поэтому можно утверждать, что рабочий зазор является важным параметром, значение которого оказывает влияние на показатели качества работы клеверотерки.

Степень дробления d и степень вытирания семян ε находятся в прямой зависимости от продолжительности обработки материала в устройстве, которая в свою очередь является функцией скорости. Существуют работы⁸ [1], в которых предлагается определять скорость перемещения материала с учетом поправочного коэффициента, который можно определить экспериментально для каждого типа устройств. Данный коэффициент зависит от множества факторов: от свойств материала, от конструкции рабочих органов, и имеет широкие пределы значений. Его применение возможно только в том случае, если в устройстве наличие бичей является

³ Мухин П. Г. Исследование процесса вытирания семян многолетних трав : дис. ... канд. техн. наук. М., 1952. 146 с.

⁴ Панасенко В. Е. Обоснование параметров и режимов работы терочного устройства аксиально-роторного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 176 с.

⁵ Ли А. Обоснование параметров и режимов работы клеверотерки // Обоснование параметров и режимов работы клеверотерки : сб. ст. по итогам II междунар. науч.-практич. конф. «Горячкинские чтения», посвященной 150-летию со дня рождения академика В. П. Горячкина. Ташкент, 2019. С. 182–187. EDN: JHPSBT

⁶ Ахламов Ю. Д., Гринчук И. Н., Журкин В. К. Машины для семеноводства трав. М. : Машиностроение, 1968. 172 с.

⁷ Панасенко В. Е. Обоснование параметров и режимов работы терочного устройства аксиально-роторного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 176 с.

⁸ Там же.

определяющим фактором осевой скорости движения обрабатываемого материала в устройстве. Если это условие не соблюдается, то данное выражение применять нельзя⁹. Также оно не учитывает инерционные силы, возникающие в рабочем зазоре между декой и бичами. Наличие всех этих обстоятельств не позволяет получить точное значение осевой скорости движения¹⁰.

В диссертации М. М. Анеляк нам удалось найти уравнение движения частицы материала в вертикальном аксиальном вытирающем устройстве семян трав¹¹. Проанализировав данное выражение, можно сделать вывод, что материал движется в тангенциальном направлении за счет разности коэффициентов трения материала о рабочие поверхности бича и деки. Решение данного уравнения позволяет определить время t обработки материала:

$$t = \frac{7\pi \cdot L \cdot R_6 \cdot m_0 \cdot k}{3h_{oc} \cdot E(k_2 - k_1) \cdot \left(\frac{3m_0}{4\pi \cdot \gamma_G}\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{R_6 \cdot m_0 \cdot k \cdot \omega_0}{E(k_2 - k_1)}}, \text{ с}, \quad (1)$$

где L, R_6 – длина и радиус барабана соответственно; m_0 – масса частицы материала в начале обработки; k – коэффициент снижения массы частицы обрабатываемого материала; h_{oc} – смещение частицы за один оборот барабана вдоль оси; E – модуль Юнга; k_1 и k_2 – коэффициенты трения частицы о барабан и деку; γ_G – показатель объемной массы обрабатываемого материала.

При этом количество воздействий p на частицу в обрабатываемом материале

зависит от количества устанавливаемых бичей:

$$p = \frac{t \cdot Z_1}{4\pi} \cdot (\omega - \dot{\varphi}), \quad (2)$$

где Z_1 – количество бичей; $\omega, \dot{\varphi}$ – угловые скорости барабана и частицы соответственно.

Длина деки равна:

$$L = f_{вб} \cdot k \cdot b \cdot t \cdot g \cdot \beta + 2R_d \cdot \varphi \cdot \sin \alpha_p \cdot n_{вт}, \text{ м}, \quad (3)$$

где $f_{вб}$ – коэффициент трения частицы о бич; β – угол наклона рифов бича к оси барабана; b – ширина бича; R_d – радиус кривизны деки; α_p – угол наклона спиральных ребер; φ – угол, определяющий положение частицы в рабочем зазоре; $n_{вт}$ – количество витков траектории движения элементарного слоя в устройстве для вытирания семян трав.

Ю. Д. Ахламовым предложено уравнение, с помощью которого появляется возможность определить количество Z бичей [4]:

$$Z_6^2 \frac{\pi \cdot D_6 \cdot \rho}{2L \cdot \text{tg} \beta} \times \left[\left(1 + \frac{2b}{V_{окр} \sqrt{\frac{2\delta_n(k_\delta - 1)}{g}}} \right) \cdot Z_6 - \frac{2\pi \cdot D_6}{2\delta_n(k_\delta - 1)} \right] = 0, \quad (4)$$

где D_6 – диаметр вытирающего барабана; δ_n – зазор между рабочими поверхностями; k_δ – отношение расстояний от терочной поверхности до носка и пятки

⁹ Панасенко В. Е. Обоснование параметров и режимов работы терочного устройства аксиально-ротаторного типа.

¹⁰ Корякин В. А. Обоснование основных параметров и режимов работы терочного устройства к семяочистительной машине : дис. ... канд. техн. наук. Киров, 2009. 157 с.

¹¹ Анеляк М. М. Обоснование технологического процесса и параметров рабочих органов устройства для вытирания семян многолетних бобовых трав : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Глеваха (Украина), 1994. 25 с.

бича соответственно; $V_{\text{окр}}$ – окружная скорость барабана.

Выражение (4) применимо в случае, если сохраняется условие, что материал не попадает внутрь барабана, а находится всегда в рабочем зазоре, между терочной поверхностью деки и носком или пяткой бича барабана.

Соответственно минимальная длина L деки определяется по выражению:

$$L = \frac{Z_l \cdot b \cdot \text{tg}\beta}{2k_T}, \text{ м} \quad (5)$$

где k_T – отношение всех бичей установленных на барабан к числу бичей, транспортирующих материал в устройстве.

В аксиальном устройстве количество p воздействий можно определить по уравнению [11]:

$$p = \frac{2k_T \cdot L}{b \cdot \text{tg}\beta}. \quad (6)$$

Ф. А. Ахмад после решения дифференциального уравнения получил уравнение, которое имеет существенное отличие от выражения (6)¹²:

$$p = \frac{V_{\text{лин}} \cdot Z_6 \cdot N_{\text{в}}}{V_{\text{ч}} \cdot \cos \varphi_{\text{тр}}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{лин}}$ – скорость движения точки бича, определяемая по длине пути, пройденного в единицу времени; $N_{\text{в}}$ – число витков траектории движения слоя вороха; $V_{\text{ч}}$ – осевая скорость частицы обрабатываемого материала.

В. М. Холанский с соавторами сходятся во мнении, что степень ε вытирания семян является основным

показателем качества работы вытирающих устройств [12]. Ее можно определить по уравнению¹³:

$$\varepsilon = [1 - (1 - e)^p] \cdot 100, \% \quad (8)$$

где e – вероятность вытирания семени за одно воздействие бича на частицу, $e = 0,03 \dots 0,08$ ¹⁴ [1; 11; 12]; p – количество воздействий бичей на частицу за время обработки.

Проанализировав уравнение (8) и на основе проведенного выше обзора, с учетом утверждений, которые не подлежат сомнению у большинства авторов, можно утверждать, что зависимость степени вытирания от времени обработки является функцией от скорости движения частиц в вытирающем устройстве при их перемещении от входа к выходу устройства. При этом скорость перемещения материала зависит от основных кинематических и конструктивных параметров клеверотерок.

В свою очередь, степень вытирания зависит не только от характера воздействий, но от его количества на обрабатываемый материал. Увеличение или уменьшение данного количества возможно за счет изменения количества бичей барабана, а также изменения кинематического режима работы клеверотерки.

Таким образом, определив количество воздействий и скорость движения обрабатываемого вороха, появляется возможность теоретического определения степени вытирания. В свою очередь, и производительность клеверотерок напрямую зависит от скорости перемещения материала от входа к выходу устройства.

¹² Ахмад Ф. А. Домолот и вытирание семян клевера в зерноуборочном комбайне: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1993. 20 с.

¹³ Ахламов Ю. Д., Гринчук И. Н., Журкин В. К. Машины для семеноводства трав. М.: Машиностроение, 1968. 172 с.

¹⁴ Там же; Панасенко В. Е. Обоснование параметров и режимов работы терочного устройства аксиально-роторного типа: дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 176 с.

Основным методом определения скорости обрабатываемого материала является представление рабочего процесса работы вытирающего устройства с помощью математического моделирования на основе дифференциальных уравнений движения с определенными допущениями.

М. В. Мурзин получил уравнения движения частиц в тангенциальном вытирающем устройстве по бичу барабана и в межбичевом пространстве. Но полученные уравнения не учитывают технологические параметры вытирающего устройства, а именно величину рабочего зазора и длину деки, которые влияют на процесс движения, поэтому полученные значения скорости будут иметь весьма приблизительные значения¹⁵.

А. А. Зайцев в своей работе вывел уравнения движения в канале тангенциально-аксиального молотильно-сепарирующего устройства при обработке частиц материала. В полученном выражении автор при помощи введенных коэффициентов учитывает способность бичей захватывать материал и форму рабочей поверхности деки¹⁶.

Наиболее точно и полно процесс перемещения материала в аксиально вытирающем устройстве описан учеными ТСХА¹⁷ [13]. В рассмотренном ими

устройстве движение частиц материала осуществляется за счет применения направителей специального назначения. Авторы рассматривают движение материала в виде нескольких фаз: фаза без взаимодействия частиц с рабочими органами, фаза взаимодействия с бичами барабана, фаза взаимодействия с декой, фаза одновременного взаимодействия частиц с декой и бичами барабана. Получено несколько уравнений, описывающих каждую фазу.

Проведенный анализ и обзор теоретических исследований¹⁸ [14] вытирающих устройств, имеющих рабочие органы в виде барабана и деки, позволяет сделать вывод, что до сих пор не существует прочно сложившейся теории, которая однозначно описывает технологический процесс. Основная причина в том, что на характер движения материала в устройстве оказывает влияние большое количество факторов, взаимосвязь между которыми невозможно описать какими-то зависимостями. Поэтому при теоретических исследованиях имеет место ряд допущений, а сами исследования основываются на экспериментальных исследованиях конкретного типа устройств. Описание движения обрабатываемого материала происходит дифференциальными уравнениями с экспериментальными

¹⁵ Мурзин М. В. Совершенствование процесса предварительной обработки невяного вороха семенников трав : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж. 2002. 19 с.

¹⁶ Зайцев А. А. Обоснование параметров аксиально-тангенциального молотильно-сепарирующего устройства для обмолота зерновых культур : дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1986. 236 с.

¹⁷ Богиня М. В. Обоснование параметров и режимов работы терочно-сепарирующего устройства : дис. ... канд. техн. наук. М., 1992. 161 с.; Панасенко В. Е. Обоснование параметров и режимов работы терочного устройства аксиально-роторного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 176 с.

¹⁸ Ахламов Ю. Д., Гринчук И. Н., Журкин В. К. Машины для семеноводства трав. М. : Машиностроение, 1968. 172 с.; Кулагин М. С. Механизация процесса выделения семян клевера из пыжины в условиях увлажненной зоны : дис. ... канд. техн. наук. М., 1966. 170 с.; Ляуконис И. Т. Исследование процессов обмолота и сепарации при уборке семенников красного клевера комбайнами с получением пыжины в условиях Литовской ССР : дис. ... канд. техн. наук. Раудонварис (Литва), 1970. 201 с.; Микотин В. Я. Исследование технологического процесса вытирания семян клевера : дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1968. 265 с.; Панасенко В. Е. Обоснование параметров и режимов работы терочного устройства аксиально-роторного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 176 с.; Пигалев А. К. Изыскание и исследование приспособления к зерноуборочному комбайну для уборки семенников многолетних трав : дис. ... канд. техн. наук. М., 1977. 174 с.

коэффициентами и поправками, полученными в результате экспериментальных исследований. Решение полученных дифференциальных уравнений дает возможность определить скорость движения частиц материала. В свою очередь, значение скорости движения частицы позволит определить показатели качества работы и производительность, а также необходимые для этого конструктивные параметры определенного типа вытирающих устройств.

Целью статьи является теоретическое обоснование зависимости основных параметров аксиальных вытирающих устройств от требований по обеспечению определенного качества вытирания семян трав.

Материалы и методы

При движении материала в вытирающем устройстве рабочие элементы (бичи, барабан и дека) многократно воздействуют на обрабатываемые частицы. При этом происходит удар, защемление и относительное перемещение материала, что приводит к разрушению бобиков.

С целью теоретического подтверждения основных параметров аксиальных вытирающих устройств, которые обеспечивают получение высокой эффективности работы нужной производительности, описания процесса взаимодействия бичей барабана и деки с частицами обрабатываемого материала, применено математическое моделирование процесса движения материала в клеверотерке. В работах, посвященных изучению аксиальных вытирающих устройств, использующих

в качестве рабочих органов барабан, снабженный бичами, и деку, отмечается, что процесс является довольно сложным¹⁹ [15]. Однако априорные сведения и собственные наблюдения позволяют описать рабочий процесс. Материал, который подлежит обработке через загрузочное устройство, поступает в зазор между рабочими поверхностями деки и барабана, где происходит его вытирание. Движение частиц материала происходит одновременно вдоль оси и по окружности вращения барабана, т. е. по винтовой траектории. Это движение происходит за счет расположения бичей барабана под углом γ его продольной оси. На частицу материала происходит воздействие в виде удара и защемления между бичами барабана и декой с относительным перемещением, за счет этого и выделяются семена из оболочек бобиков.

В статье приводятся теоретические исследования аксиального вытирающего устройства клеверотерки К-0,3, которая спроектирована в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока²⁰ (рис. 1) [16].

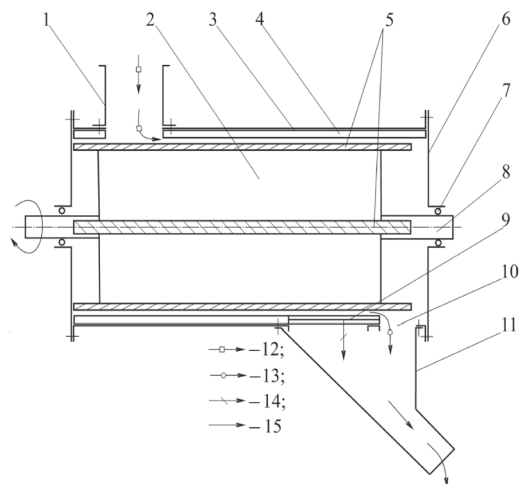
Работа клеверотерки проходит следующим образом. При помощи загрузочного устройства материал подается в горловину 1. Проходит обработку в рабочем зазоре между декой 4 и вращающимися бичами 5 и выводится наружу через выгрузное окно 10 для дальнейшей обработки в машинах технологической линии. Выделение семян происходит за счет сил трения и силы нормального давления, а перемещение – за счет рифов бичей барабана.

¹⁹ Мухин П. Г. Исследование процесса вытирания семян многолетних трав : дис. ... канд. техн. наук. М., 1952. 146 с.; Панасенко В. Е. Обоснование параметров и режимов работы терочного устройства аксиально-роторного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 176 с.; Бурков А. И., Симонов М. В., Корякин В. А. Исследование работы аксиально-роторного вытирающего устройства // Разработка и внедрение технологий и технических средств для АПК Северо-Восточного региона Российской Федерации : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. Киров : НИИСХ Северо-Востока, 2007. С. 228–231; Бурков А. И., Симонов М. В. Определение длины аксиально-роторного терочного устройства семян трав // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства : сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф. М. : ВИМ, 2015. С. 144–148.

²⁰ Бурков А. И., Симонов М. В., Корякин В. А. Использование аксиально-роторного вытирающего устройства для вытирания семян клевера // Докл. Рос. академии с.-х. наук. 2009. № 5. С. 58–60.



a)



b)

Р и с. 1. Общий вид (а) и технологическая схема (б) клеверотерки К-0,3Б:
 1 – загрузочная горловина; 2 – барабан; 3 – корпус; 4 – дека; 5 – бичи; 6 – фланец; 7 – подшипник;
 8 – вал; 9 – щели деки; 10 – выгрузное окно; 11 – приемник перетертого материала;
 12 – исходный материал; 13 – остатки перетертого материала;
 14 – семена и мелкие примеси;
 15 – перетертый материал

F i g. 1. General view (a) and technological scheme (b) of the K-0.3B clover thresher:
 1 – loading neck; 2 – drum; 3 – body; 4 – deck; 5 – whips; 6 – flange; 7 – bearing; 8 – shaft;
 9 – deck slots; 10 – unloading window; 11 – receiver of ground material; 12 – source material;
 13 – remnants of ground material; 14 – seeds and small impurities; 15 – ground material

Результаты исследования

С целью упрощения достаточно сложного процесса движения обрабатываемого материала в устройстве прием допущения, что материал во время обработки представляет собой большое число отдельных частиц, при этом трение между частицами отсутствует.

Введем подвижную систему координат $Ox_1y_1z_1$ ²¹ (рис. 2) [17], в которой и рассмотрим перемещение частиц. Эта подвижная система завязана с поверхностью рифа бича и движется вместе с ним по окружности с векторной величиной скорости ω относительно оси вращения Oz . Далее принимаем упрощение, что риф бича является элементом винтовой поверхности

и переносим движение частицы в подвижной системе $Ox_1y_1z_1$ в естественные оси $\bar{r}, \bar{n}, \bar{b}$.

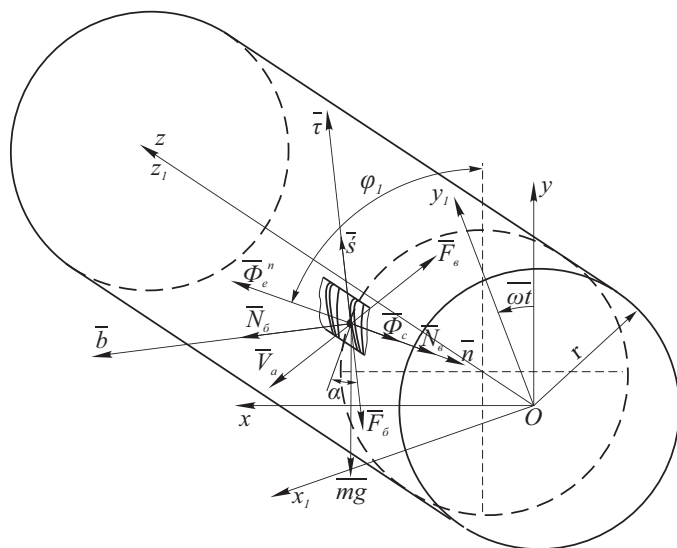
Уравнение проекции траектории движения крайней поверхности бича на поверхность деки в виде цилиндра имеет вид²²:

$$\begin{aligned} x_1 &= r_d \cdot \cos(\omega t + \varphi_1); \\ y_1 &= r_d \cdot \sin(\omega t + \varphi_1); \\ z_1 &= r_d \cdot \omega \cdot t \cdot \operatorname{tg} \alpha, \end{aligned} \quad (9)$$

где r_d – радиус деки, м; α – угол наклона рифов бичей, град; ω – угловая скорость вращения барабана, c^{-1} ; φ_1 – угол, определяющий начальное положение частицы, град; t – время, с.

²¹ Симонов М. В., Корякин В. А. Теоретическое обоснование основных параметров вытирающего устройства семяочистительной машины // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2007. № 10. С. 98–102.

²² Сысуев В. А., Алешкин А. В., Кормщиков А. Д. *Методы механики в сельскохозяйственной технике*. Киров, 1997. 218 с.



Р и с. 2. Схема сил в аксиальном устройстве для вытирания семян трав, действующих при взаимодействии с боковой поверхностью рифа бича

F i g. 2. Diagram of forces in an axial threshing device when it interacts with the lateral surface of the reef of the rasps

При этом движение частицы можно представить в виде векторного выражения:

$$m \frac{d^2 \bar{s}}{dt^2} = \bar{\Phi}_c + \bar{\Phi}_e^n + \bar{N}_b + \bar{N}_6 + \bar{F}_b + \bar{F}_6 + m\bar{g}, \quad (10)$$

где $\bar{\Phi}_c$ – инерционная сила; \bar{s} – относительная скорость частицы материала; $\bar{\Phi}_e^n$ – центробежная инерционная сила; \bar{N}_b – сила нормального давления слоя обрабатываемого материала; \bar{N}_6 – сила нормального давления рифа бича барабана; \bar{F}_b – сила трения бича об обрабатываемый материал.

В качестве допущения примем, что сила тяжести не оказывает влияния на движение частицы, так как оно происходит в симметричном пространстве, и равна нулю. После проецирования уравнения движения (10) на оси $\bar{\tau}, \bar{n}, \bar{b}$ выражение будет выглядеть следующим образом:

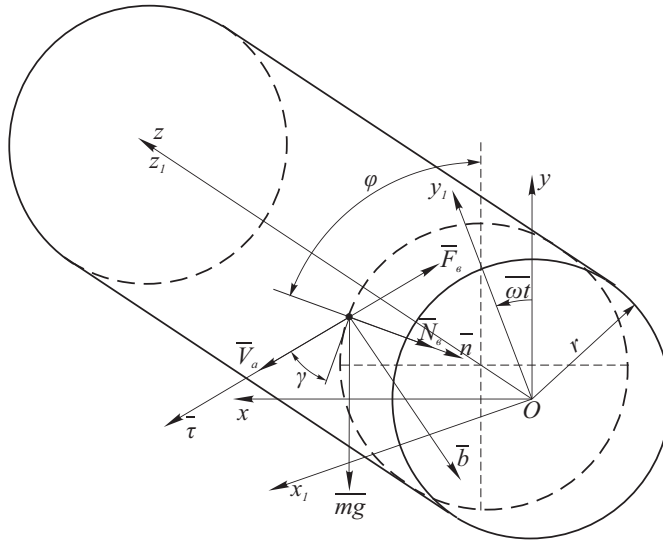
$$\begin{cases} \ddot{s} = \frac{N_b \cdot f_b}{m} \cdot \left(\frac{\omega \cdot r \cdot \cos \alpha - \dot{s}}{\sqrt{\dot{s}^2 + (\omega \cdot r)^2 - 2 \cdot \dot{s} \cdot \omega \cdot r \cdot \cos \alpha}} \right) - \frac{N_6 \cdot f_6}{m} \cdot \frac{\dot{s}}{|\dot{s}|}; \\ n: N_b = m \cdot \left(\frac{\dot{s}^2 \cdot \cos^2 \alpha}{r} - 2 \cdot \omega \cdot \dot{s} \cdot \cos \alpha + \omega^2 \cdot r \right); \\ b: N_6 = N_b \cdot f_b \cdot \frac{\omega \cdot r \cdot \sin \alpha}{\sqrt{\dot{s}^2 + (\omega \cdot r)^2 - 2 \cdot \dot{s} \cdot \omega \cdot r \cdot \cos \alpha}}. \end{cases} \quad (11)$$

где f_b и f_6 – коэффициенты трения частицы соответственно о слой вороха и о бич барабана.

Абсолютная скорость движения частицы после воздействия бича барабана определится из выражения:

$$V_a = \sqrt{\dot{s}^2 + (\omega \cdot r)^2 - 2 \cdot \dot{s} \cdot \omega \cdot r \cdot \cos \alpha}, \text{ м/с.} \quad (12)$$

Каждый раз после воздействия бича на частицу она движется по инерции в межбичевом пространстве, при этом ее начальной скоростью является скорость схождения с бича (рис. 3).



Р и с. 3. Схема сил, действующих на частицу при ее движении в межбичевом пространстве вытирающего устройства после взаимодействия с бичом барабана

F i g. 3. Diagram of the forces acting on the particle during its movement in the inter-rasps space of the threshing device after interaction with the rasp of the drum

Уравнение движения частицы в векторном выражении примет вид:

$$m \frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = \vec{N}_B + \vec{F}_B + m \vec{g}. \quad (13)$$

Как и в предыдущих расчетах, для упрощения процесса примем $m \vec{g} = 0$.

Уравнение (13) при проецировании на $\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$ примет вид:

$$\begin{cases} \tau : m \frac{d^2 s}{dt^2} = -F_B; \\ n : m \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 \frac{\cos^2 \gamma}{r} = N_B; \\ b : m \frac{d^2 s}{dt^2} = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где γ – угол между \vec{V}_0 и плоскостью Oxy .

Математически преобразовав систему уравнений (14) и приняв начальные

условия: $t = 0, V = V_0; C_1 = -\frac{1}{V_0}$, где C_1 – постоянная интегрирования, получим

выражения для определения скорости и перемещения частицы:

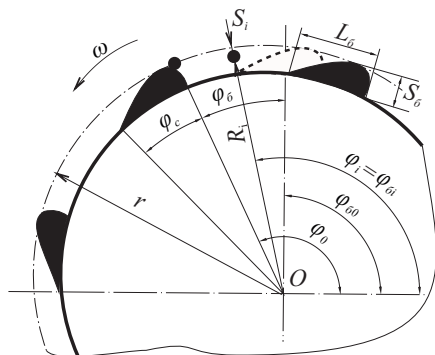
$$V = \frac{V_0}{1 + f_B \cdot \frac{\cos^2 \gamma}{r} \cdot V_0 \cdot t}, \text{ м/с}; \quad (15)$$

$$s = \frac{r}{\cos^2 \gamma \cdot f_B} \cdot \ln \left| 1 + f_B \cdot \frac{\cos^2 \gamma}{r} \cdot V_0 \cdot t \right| + C_2, \text{ м}, \quad (16)$$

где C_2 – постоянная интегрирования.

Во время перемещения частицы в межбичевом пространстве барабан продолжает вращаться. Примем, что в момент схода частицы с бича его задняя грань определяется углом φ_0 , а положение частицы – параметрами: $R_i = r$ и $\varphi_i = \varphi_0$ (рис. 4).

Частица взаимодействует с бичом на его передней грани в межбичевом пространстве, при этом ее положение определяется углом φ_{00} . Контакт бича с частицей состоится в момент, когда угловые координаты данного положения будут удовлетворять условию $\varphi_i = \varphi_{0i}$, которые можно определить из выражений:



Р и с. 4. Схема расположения бичей барабана

F i g. 4. Schematic diagram of the drum rasps

$$\varphi_i = \varphi_{i0} + \frac{360 \cdot s \cdot \cos\gamma}{2 \cdot \pi \cdot r}, \text{ град}; \quad (17)$$

$$\varphi_{bi} = \varphi_{i0} - \frac{360}{Z_6} + \varphi_c + \omega \cdot t, \text{ град}, \quad (18)$$

где φ_{i0} – угол, при котором частица сходит с бича, град.; φ_c – угол между передней и задней гранями бича, град.

При совместном решении выражений (18), (17) и (16) появляется возможность определить параметры движения частицы после взаимодействия с бичом до ее следующего контакта с ним.

Выражения для определения скорости частицы при движении от выхода к входу в вытирающем устройстве при многократном контакте с бичами барабана является переменной величиной. Поэтому ее осевую скорость определяют как среднее значение:

$$V_{oc} = \sum s_{oc} / \sum t_b, \text{ м/с}, \quad (19)$$

где $s_{oc} = (s_{oc.6} + s)$ – среднее значение осевого перемещения частицы, м; t_b – среднее значение времени одного взаимодействия и движения в межбичевом пространстве, с.

Значение всего осевого перемещения частицы соответствует длине вытирающего устройства:

$$\sum S_{oc} = L, \text{ м}. \quad (20)$$

Время обработки частицы соответствует сумме интервалов времени всех перемещений частицы:

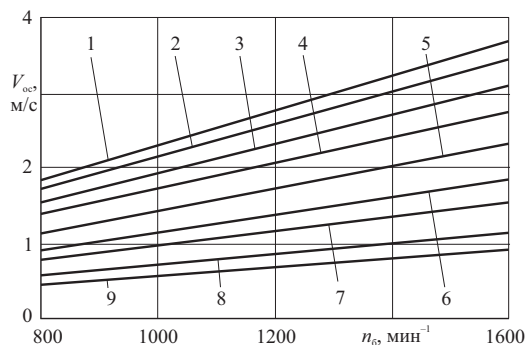
$$\sum t_b = t_{TV}, \text{ с}. \quad (21)$$

Соответственно уравнение (9) примет вид:

$$V_{oc} = \frac{L}{t_{TV}}, \text{ м/с}, \quad (22)$$

где L – длина устройства, м; t_{TV} – время обработки, с.

Далее проведем решение системы уравнений (11), (15), (16), (17), (18), (19), чтобы изучить влияние частоты n_6 вращения барабана на скорость движения части в вытирающем устройстве. При этом параметры принимаем равные $r = 0,14$ м; $\alpha = 36$ град; $f_6 = 0,4$; $f_b = 0,7$ начальные условия: $t_0 = 0$, $s_0 = 0$, $s(0) = s_0$, интервал движения: $\Delta t = 0,0001$ с. Графическое изменение осевой скорости движения частицы приведено на рисунке 5 в зависимости от частоты n_6 вращения барабана, при этом количество бичей с прямым рифлением принимаем различное ($Z_6 = 4; 6; 8$ шт); сочетание бичей с прямым и обратным рифлением ($Z_6 = 3 + 1; 4 + 2; 5 + 1; 5 + 3; 6 + 2; 7 + 1$, где первое слагаемое обозначает количество бичей с прямым рифлением, а второе – с обратным, шт).



Р и с. 5. Изменение средней осевой скорости V_{oc} движения частицы в аксиальном вытирающем устройстве в зависимости от частоты n_b вращения барабана: 1 – $Z_б = 8$; 2 – $Z_б = 6$; 3 – $Z_б = 4$; 4 – $Z_б = 7 + 1$; 5 – $Z_б = 5 + 1$; 6 – $Z_б = 6 + 2$; 7 – $Z_б = 3 + 1$; 8 – $Z_б = 4 + 2$; 9 – $Z_б = 5 + 3$

Fig. 5. Dependences of the change in the average axial velocity V_{oc} of the particle motion in the axial threshing device on the frequency of rotation of the drum: 1 – $Z_б = 8$; 2 – $Z_б = 6$; 3 – $Z_б = 4$; 4 – $Z_б = 7 + 1$; 5 – $Z_б = 5 + 1$; 6 – $Z_б = 6 + 2$; 7 – $Z_б = 3 + 1$; 8 – $Z_б = 4 + 2$; 9 – $Z_б = 5 + 3$

Если проанализировать рисунок 5, можно сделать вывод, что скорость частицы возрастает при увеличении частоты вращения барабана. При этом скорость возрастает, если число бичей с прямым рифлением растёт, и уменьшается, если увеличивается число бичей с обратным рифлением, т. е. бичи с прямым рифлением являются транспортирующими и сокращают время обработки.

Степень вытирания семян ε является главным показателем для вытирающих устройств. По ней определяется, насколько эффективно работает устройство. Степень вытирания определяется выражением (8), при этом принимаем, что вероятность e вытирания семени за один контакт с бичом остается постоянной. При этом частица проходит в устройстве расстояние L за время обработки $t_{Тв}$, двигаясь со скоростью V_{oc} .

Составим систему уравнений, по которой можно определить количество воздействий p бичей барабана, вращающегося с частотой n_b , на обрабатываемый материал, частицы которого движутся по образующей внутренней рабочей поверхности деки:

$$\begin{cases} t_{Тв} = \frac{L}{V_{oc}}, \text{ с;} \\ p = \frac{Z \cdot n_b}{60} \cdot t_{Тв}. \end{cases} \quad (23)$$

Далее получаем уравнение:

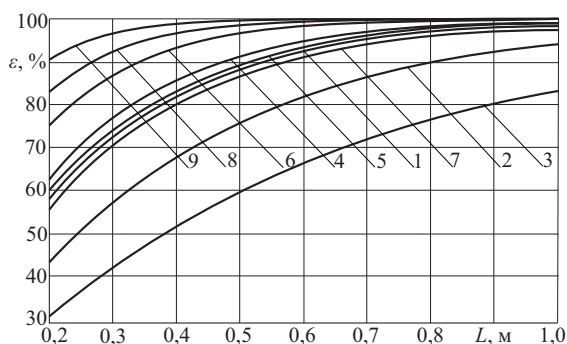
$$p = Z \cdot n_b \cdot \frac{L}{60 \cdot V_{oc}}. \quad (24)$$

Учитывая уравнение (24), вероятная степень вытирания аксиального устройства может определяться выражением:

$$\varepsilon = [1 - (1 - e)^{\frac{Z \cdot n_b \cdot L}{60 \cdot V_{oc}}}] \cdot 100, \%. \quad (25)$$

Проведем графический анализ (рис. 6) решения уравнения (24), где проанализируем, как влияет длина вытирающего устройства на степень вытирания.

В качестве условий принимаем следующие параметры: $r = 0,14$ м; $\alpha = 36$ град; $h = 0,008$ м; $\delta = 0,004$ м; $f_b = 0,4$; $f_b = 0,7$; $e = 0,06$ [8] и $n_b = 1200$ мин⁻¹; количество бичей различное.



Р и с. 6. Изменение степени ε вытирания в зависимости от длин L аксиального вытирающего устройства:

1 – $Z_6 = 8$; 2 – $Z_6 = 6$; 3 – $Z_6 = 4$; 4 – $Z_6 = 7 + 1$; 5 – $Z_6 = 5 + 1$; 6 – $Z_6 = 6 + 2$;
7 – $Z_6 = 3 + 1$; 8 – $Z_6 = 4 + 2$; 9 – $Z_6 = 5 + 3$

F i g. 6. Dependences of the change in the degree of threshing of seeds ε on the lengths L of the axial threshing device:

1 – $Z_6 = 8$; 2 – $Z_6 = 6$; 3 – $Z_6 = 4$; 4 – $Z_6 = 7 + 1$; 5 – $Z_6 = 5 + 1$; 6 – $Z_6 = 6 + 2$;
7 – $Z_6 = 3 + 1$; 8 – $Z_6 = 4 + 2$; 9 – $Z_6 = 5 + 3$

Обсуждение и заключение

Проведя анализ полученных в результате теоретического исследования зависимостей, можно с достаточной достоверностью утверждать, что длина устройства L , количество бичей Z_6 барабана и направление их рифов влияют на степень вытирания ε . Применение только транспортирующих бичей нецелесообразно, так как при $Z_6 = 4$ и $Z_6 = 6$ степень вытирания ε имеет самое низкое значение.

Наибольшее повышение значения степени ε происходит при увеличении длины L устройства для вытирания от 0,2 до 0,7 м при различных вариантах установки бичей барабана (линии 1, 4, 5, 6, 7, 8 и 9, рис. 6).

Также можно сделать вывод, что если руководствоваться минимальной степенью ε вытирания семян, увеличение длины L устройства более 0,7 м не имеет смысла. Так, например, длина L должна находиться в пределах 0,6...0,7 м при

обеспечении степени вытирания ε не менее 90 %.

Следует отметить, что проведенные теоретические исследования подтверждены ранее проведенными экспериментальными исследованиями²³. При испытании аксиально вытирающего устройства, имеющего следующие параметры: $D = 0,3$ м; $L = 0,6$ м; $Z_6 = 3 + 1$; $q = 300$ кг/ч; $n_6 = 1200$ мин⁻¹, степень составила 89,5 %, а теоретически по уравнению (24) при производительности вытирающего устройства $q = 300$ кг/ч и частоте вращения барабана $n_6 = 1000$ мин⁻¹ получены значения параметров: $L = 0,6...0,8$ м; $D = 0,16...0,30$ м и $\varepsilon = 91,5$ %.

Таким образом установлено, что полученные в результате исследования теоретические зависимости позволяют определить основные параметры аксиальных устройств для вытирания семян в зависимости от предъявляемых к устройству требований по качеству выполнения технологического процесса.

²³ Симонов М. В., Корякин В. А. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров аксиально-роторного вытирающего устройства на степень вытирания и дробление семян // Совершенствование технологий и средств механизации производства продуктов растениеводства и животноводства : сб. научных трудов науч.-практ. конф. Киров : НИИСХ Северо-Востока, 2007. С. 45–48; Бурков А. И., Симонов М. В., Корякин В. А. Использование аксиально-роторного вытирающего устройства для вытирания семян клевера // Доклады Российской академии с.-х. наук. 2009. № 5. С. 58–60.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халанский В. М., Горбачев И. В. Разработка технических средств для комбайновой уборки семенных посевов трав // Достижения науки и техники АПК. 2009. № 10. С. 36–39. EDN: LURKZB
2. Dragulenko V., Kurasov V., Litvinov A. Theoretical Studies of the Movement of the Lucerne Bean in the Chamber of the Threshing Device // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2022. Vol. 2661. Article no. 070005. <https://doi.org/10.1063/5.0107083>
3. Смелик В. А., Новиков М. А., Перекопский А. Н. Анализ машинных технологий уборки семян клевера лугового в условиях северо-западного региона РФ // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (67). С. 164–174. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2022-2-164-174>
4. Ахламов Ю. Д., Отрошко С. А., Шевцов А. В. Машина для вытирания семян // Техника в сельском хозяйстве. 1997. № 3. С. 28. EDN: VJITKH
5. Алешкин А. В., Симонов М. В., Мокиев В. Ю. Теоретическое определение скоростей движения частиц обрабатываемого материала в тангенциальном терочном устройстве семян трав // Вестник Федерального Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский Государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. № 4 (86). С. 21–26. EDN: UYHVPF
6. Карпов Н. А., Кшникаткин С. А., Аленин П. Г. Разработка устройства для выделения семян из семенников-биотипов растений многолетних бобовых трав при селекционном отборе // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Т. IV. Пенза, 2021. С. 241–243. EDN: ZFLVPI
7. Обзор и анализ машин для обмолота и вытирания семян трав / Н. А. Карпов [и др.] // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : сб. материалов Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. молодых ученых. Т. 3. Пенза, 2020. С. 29–32. EDN: RINHOE
8. Анеляк М. М., Шидловский Ю. М. Экспериментальное исследование аксиально-тангенциального терочного устройства бильного типа // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Киев, 1986. Вып. 64. С. 29–32.
9. Теоретические предпосылки повышения посевных качеств семенного фонда / М. Н. Московский [и др.] // Естественные и технические науки. 2019. № 11 (137). С. 179–181. EDN: ETNAAP
10. Чугунов С. В., Рожков Г. А. Обзор устройств для вытирания и скарификации семян трав // Журнал передовых исследований в области естествознания. 2020. № 9. С. 60–62. <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2020-9-60-62>
11. Симонов М. В., Мокиев В. Ю. Теоретическое определение степени вытирания вытирающего устройства // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 5. С. 119–123. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.66.5.119-123>
12. Теоретический анализ рабочего процесса терочного устройства для обработки семенного вороха бобовых трав / В. М. Халанский [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1992. № 2. С. 153–161. EDN: SCTHWR
13. Пляка В. И. Теоретическое обоснование режимов работы аксиально-роторного молотильно-сепарирующего устройства // Доклады ТСХА. 2020. Вып. 292, ч. 1. С. 430–433. URL: <https://www.timacad.ru/science/konferentsii/sborniki-materialov-konferentsii> (дата обращения: 10.01.2023).
14. Бурков А. И., Симонов М. В. Определение длины аксиально-роторного терочного устройства семян трав // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства : сб. научных докладов Междунар. науч.-техн. конф. М. : ВИМ, 2015. С. 144–148. EDN: UFODHP
15. Бурков А. И., Симонов М. В., Корякин В. А. Использование аксиально-роторного вытирающего устройства для вытирания семян клевера // Доклады Российской академии с.-х. наук. 2009. № 5. С. 58–60. EDN: KYYSCL
16. Симонов М. В., Корякин В. А. Определение пропускной способности аксиально-роторного терочного устройства // Техника в сельском хозяйстве. 2010. № 6. С. 6–9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15619408> (дата обращения: 10.01.2023).

17. Симонов М. В., Корякин В. А. Теоретическое обоснование основных параметров вытирающего устройства сеячистительной машины // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2007. № 10. С. 98–102. EDN: KGLOMB

Поступила 19.01.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023; принята к публикации 01.07.2023.

Об авторах:

Симонов Максим Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3805-9246>, Researcher ID: F-7895-2018, Scopus ID: 57209273813, simaksim@mail.ru

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, Scopus ID: 57190970844, PlotnikovSA@bk.ru

Мокиев Валентин Юрьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории зерно- и сеячистительных машин Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>, Researcher ID: HSF-7094-2023, Scopus ID: 57209274547, dizel154@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

М. В. Симонов – научное руководство, поиск аналитических материалов в отечественных и зарубежных источниках, анализ полученных результатов.

С. А. Плотников – критический анализ и доработка текста.

В. Ю. Мокиев – подготовка первоначального варианта текста, анализ и дополнение текста статьи, подготовка текста статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Khalansky V.M., Gorbachev I.V. Development of Technical Means for Combine Harvesting of Seed Crops of Grasses. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*. 2009;(10):36–39. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14014086> (accessed 15.01.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Dragulenko V., Kurasov V., Litvinov A. Theoretical Studies of the Movement of the Lucerne Bean in the Chamber of the Threshing Device. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 2022;2661(1):070005. <https://doi.org/10.1063/5.0107083>
3. Smelik V.A., Novikov M.A., Perekopsky A.N. Analysis of Machine Technologies for Harvesting Meadow Clover Seeds in the Conditions of the North-Western Region of the Russian Federation. *Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2022;(2):164–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2022-2-164-174>
4. Akhlamov Yu.D., Otroshko S.A., Shevtsov A.V. Machine for Wiping Seeds. *Machinery in Agriculture*. 1997;(3):28. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25377540> (accessed 15.01.2023). (In Russ.)
5. Aleshkin A.V., Simonov M.V., Mokiev V.Yu. Theoretical Determination of the Velocities of the Particles of the Processed Material in the Tangential Grating Device of Grass Seeds. *Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "V.P. Goryachkin Moscow State Agroengineering University"*. 2018;(4):21–26. (In Russ.) EDN: UYHVP
6. Karpov N.A., Kshnikatkin S.A., Alenin P.G. [Development of a Device for Isolating Seeds from Testes-Biotypes of Plants of Perennial Legumes During Selective Selection]. In: *Innovative Ideas of Young Researchers for the Agro-Industrial Complex: A Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Penza; 2021. p. 241–243. (In Russ.)

7. Karpov N.A., Kshikatkin S.A., Voronova U.A., et al. Review and Analysis of Machines for Threshing and Wiping Grass Seeds. In: Contribution of Young Scientists to the Innovative Development of the Agro-industrial Complex of Russia: Collection of Materials of the All-Russian (national) Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Penza; 2020;3:29–32. (In Russ.) EDN: RIHHOE
8. Anelyak M.M., Shidlovsky Yu.M. Experimental Study of an Axial-Tangential Grating Device of a Bilny Type. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 1986;(64):29–32. (In Russ.)
9. Moskovsky M.N., Borzenko S.I., Podlesny D.S., Kostrov I.A. [Theoretical Prerequisites for Improving the Sowing Qualities of the Seed Fund]. *Natural and Technical Sciences*. 2019;(11):179–181. (In Russ.)
10. Chugunov S.V., Rozhkov G.A. Review of Devices for Wiping and Scarification of Grass Seeds. *Journal of Advanced Research in the Field of Natural Science*. 2020;(9):60–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2572-4347-2020-9-60-62>
11. Simonov M.V., Mokiev V.Yu. [Theoretical Determination of the Degree of Treshing of the Treshing Device]. *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2018;(5):119–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.66.5.119-123>
12. Khalansky V.M., Panasenko V.E., Bagina M.V., Akhmad F.A. Theoretical Analysis of the Working Process of a Grating Device for Processing a Seed Pile of Legumes. *Izvestiya Timiryazevskoy Agriculturnoy Akademii*. 1992;(2):153–161. (In Russ.) EDN: SCTHWR
13. Plyaka V.I. [Theoretical Substantiation of the Modes of Operation of an Axial-Rotor Threshing-Separating Device]. In: Reports of the TLC. 2020. Issue 292, part 1. p. 430–433. Available at: <https://www.timacad.ru/science/konferentsii/sborniki-materialov-konferentsii> (accessed 10.01.2023). (In Russ.)
14. Burkov A.I., Simonov M.V. Determination of the Length of the Axial-Rotary Grating Device of Grass Seeds. In: Intelligent Machine Technologies and Equipment for the Implementation of the State Program for the Development of Agriculture: Collection of Scientific Documents. International Scientific and Technical Conf. Moscow: VIM; 2015. p. 144–148. (In Russ.) EDN: UFODHP
15. Burkov A.I., Simonov M.V., Koryakin V.A. The Use of an Axial-Rotor Wiping Device for Wiping Clover Seeds. *Dokl. Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2009;(5):58–60. (In Russ.) EDN: KYYSCL
16. Simonov M.V., Koryakin V.A. Determination of the Throughput Capacity of an Axial-Rotor Grating Device. *Machinery in Agriculture*. 2010;(6):6–9. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15619408> (accessed 10.01.2023). (In Russ.)
17. Simonov M.V., Koryakin V.A. Theoretical Substantiation of the Main Parameters of the Wiping Device of the Seed Cleaning Machine. *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2007;(10):98–102. (In Russ.)

Submitted 19.01.2023; revised 18.04.2023; accepted 01.07.2023.

About the authors:

Maksim V. Simonov, 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/0000-0003-3805-9246>, Researcher ID: F-7895-2018, Scopus ID: 57209273813, simaksim@mail.ru

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, Scopus ID: 57190970844, PlotnikovSA@bk.ru

Valentin Yu. Mokiev, Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3368-1151>, Researcher ID: HSF-7094-2023, Scopus ID: 57209274547, dizel154@bk.ru

Authors contribution:

M. V. Simonov – research supervision, search for analytical materials in Russian and international sources, analyzed data.

S. A. Plotnikov – critical analyzing and editing the text.

V. Yu. Mokiev – preparation of the initial version of the text, analyzing and supplementing the text, writing of the draft.

All authors have read and approved the final manuscript.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ / FOOD SYSTEMS

УДК 635-156:004.51

doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.356-372

Оригинальная статья



Разработка графического интерфейса приложения для системы технического зрения линии сортировки плодов

П. П. Казакевич¹, А. Н. Юрин² ✉

¹ *Национальная академия наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)*

² *Научно-практический центр Национальной академии наук
Беларуси по механизации сельского хозяйства
(г. Минск, Республика Беларусь)*

✉ anton-jurin@rambler.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время интуитивно понятный графический интерфейс является обязательным компонентом современных программных продуктов, ориентированных на работу в сфере сельскохозяйственного производства.

Цель статьи. Повышение эффективности сортировки яблок посредством разработки графического интерфейса управления системой технического зрения для распознавания различных дефектов и сортировки яблок.

Материалы и методы. В работе авторами использовались методы анализа, перебора, сравнения и синтеза современных программных решений.

Результаты исследования. В результате исследований создано графическое приложение программного обеспечения блока управления системой технического зрения, содержащее все необходимые инструменты для управления и оптимизации затрат при сортировке яблок на три товарных сорта.

Обсуждение и заключение. Созданный графический интерфейс системы технического зрения использован в линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4, разработанной Научно-практическим центром Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства в 2020 г. и успешно прошедшей государственные приемочные испытания.

Ключевые слова: графический интерфейс, искусственная нейронная сеть, сортировка яблок, техническое зрение, блок управления

Финансирование: Работа выполнялась в рамках задания 5 «Разработать и освоить производство технологической линии сортировки и фасовки яблок» подпрограммы «Белсельхозмеханизация–2025» государственной научно-технической программы «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» 2021–2025 гг.

Благодарности: Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку работы.

© Казакевич П. П., Юрин А. Н., 2023



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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Казакевич П. П., Юрин А. Н. Разработка графического интерфейса приложения для системы технического зрения линии сортировки плодов // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 356–372. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.356-372>

Original article

Development of a Graphic Interface Application for the Vision System of the Fruit Sorting Line

P. P. Kazakevich^a, A. N. Yurin^b✉

^a *The National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

^b *Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization (Minsk, Republic of Belarus)*

✉ anton-jurin@rambler.ru

Abstract

Introduction. At present, an intuitive graphical interface is an indispensable component of modern agricultural-oriented software products.

Aim of the Article. The research is aimed at improving the efficiency of sorting apples by developing a graphical control interface for a vision system to recognize various defects and sort apples.

Materials and Methods. The authors used methods of analysis, enumeration, comparison and synthesis of modern software solutions.

Results. As a result of the research, there was created a graphical application of the software for the control unit of the machine vision system containing all the necessary tools for managing and optimizing costs when sorting apples into three commercial quality classes.

Discussion and Conclusion. The graphical interface of the machine vision system was used in the line LSP-4 for sorting and packing apples. It was developed by Scientific and Practical Center NAS of Belarus for Agricultural Mechanization in 2020 and successfully passed state acceptance tests.

Keywords: graphical interface, artificial neural network, apple sorting, machine vision, control unit

Funding: The work was carried out as a part of the task No. 5 “Development and use of technological line for sorting and packing apples” of the subprogram “Belselkhozmechanizatsiya–2025” of the state scientific and technical program “Innovative agro-industrial and food technologies” 2021–2025.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the paper.

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

For citation: Kazakevich P.P., Yurin A.N. Development of a Graphic Interface Application for the Vision System of the Fruit Sorting Line. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):356–372. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.356-372>

Введение

В настоящее время контроль качества плодов – мало механизированный процесс и на его выполнение приходится до 70 % всех трудозатрат их товарной обработки [1; 2]¹.

В процессе сортировки учитывается размер плодов, наличие повреждений от болезней, вредителей и механического воздействия.

Из всех известных средств автоматизации, предназначенных для такой цели, наиболее качественно этот процесс может быть выполнен только оптическими средствами контроля на основе системы технического зрения (СТЗ) [3]. Немаловажной частью СТЗ является ее электронный блок управления (ЭБУ), общение оператора с которым осуществляется посредством графического интерфейса пользователя (Graphical User Interface GUI или ГПИ)².

Графический интерфейс пользователя является обязательным компонентом современных программных продуктов, ориентированных на работу конечного пользователя. Интуитивно понятный графический интерфейс пользователя операционной системы и удобные средства управления позволяют повысить эффективность работы СТЗ. Поэтому создание графического интерфейса пользователя, позволяющего осуществлять эффективное управление СТЗ является важной задачей [4]³.

Цель исследования – повышение эффективности сортировки яблок путем разработки интуитивно понятного

графического интерфейса управления системой технического зрения для распознавания дефектов плодов.

Обзор литературы

Приступая к проектированию графического пользовательского интерфейса разработчик сразу сталкивается с большим спектром задач: от разработки принципов визуального взаимодействия человека с компьютером до реализации алгоритмов. Если считать пользовательский интерфейс виртуальным миром, с которым пользователь может взаимодействовать интуитивно понятным ему способом, то компьютерный мир должен быть похожим на реальный либо строиться на принципах онтологии – науки, изучающей существование вещей в мире [5]. Таким образом, первая задача, возникающая при проектировании ГПИ, – разработка принципов структурирования и поведения визуального компьютерного мира. Вторая задача – разработка методов реализации ГПИ. В этом направлении уже есть ряд важных решений, включающих в себя метамодель Arch [6], архитектуры MVC [7] и PAC [8]. Обзор этих решений дал в своей статье О. В. Тиханычев [9]. Он позволил, учитывая собственный опыт построения интерактивных графических систем, разработать структуру ГПИ в виде иерархии интеракторов – объектов, представляющих конкретный сценарий использования. Использование интеракторов позволяет объединить два существующих подхода к разработке интерактивной системы: со

¹ Роботизированный комплекс для сортировки яблок / П. В. Балабанов [и др.] // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Цифровизация агропромышленного комплекса» (21–23 октября 2020 г.). Тамбов : Тамбов. гос. техн. ун-т., 2020. Т. 1. С. 44–47; Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1512.00567.pdf> (дата обращения: 26.03.2023).

² Юрин А. Н. Инновационные технологические процессы и технические комплексы для интенсивного садоводства Беларуси : моногр. Минск : Беларуская навука, 2022. 208 с.

³ Жиркова А. А., Балабанов П. В., Дивин А. Г. Автоматизированная система гиперспектрального контроля дефектов яблок // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Современная наука: теория, методология, практика» (13–14 апреля 2021 г.). Тамбов : Тамбов. гос. техн. ун-т., 2021. С. 291–296.

стороны пользователя и функционального ядра [10]⁴. При этом для функционального ядра программного комплекса интерактор – элемент ГПИ, ответственный за ввод и вывод информации, а для пользователя – посредник между ним и функциональными возможностями системы, являющийся формальной основой для исследований свойств диалога. Для этого необходимо разработать модели поведения, раскрывающих внутреннюю структуру и наиболее полно отражающих внешнее поведение системы.

Как правило, для разработки моделей поведения используется унификация и стандартизация управляющих и отображающих элементов, которая может быть выполнена с использованием организационных и технологических подходов на основе требований СТБ, ГОСТ и технического задания [11–16].

В целом подходы, ориентированные на унификацию, упрощают работу по созданию пользовательских интерфейсов в рамках каждого отдельного проекта. В то же время анализ практики создания программного обеспечения показывает, что подходы, основанные на унификации компонентов, обеспечивают лишь частичное решение проблемы создания эффективного пользовательского интерфейса, в первую очередь – в части разработки компонентов общего и общесистемного программного обеспечения.

Анализ зарубежного опыта разработки программной продукции показывает, что наиболее перспективным направлением создания графического интерфейса является метод быстрого прототипирования, в рамках ко-

торого обеспечивается создание прототипов с минимальной функциональностью, но с полным набором входных и выходных форм, и совместная работа с ними будущего пользователя и разработчика с целью оперативного уточнения требований к интерфейсам программ [17–20].

Создан графический интерфейс приложения для сенсорного управления системой технического зрения, обеспечивающий возможность оптимизации настройки управления СТЗ с учетом входного качества плодов, требований пользователя и заказчика, а также принципов организации эргономики рабочих мест.

Материалы и методы

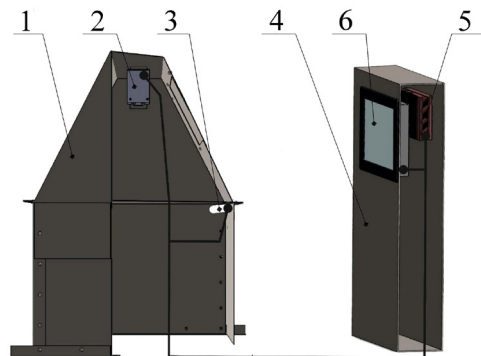
Начальными данными для разработки графического интерфейса являлись технические характеристики СТЗ для сортировки яблок в соответствии с СТБ 2288–2012⁵, а также требования к функциям приложения и архитектуре графического приложения. В работе использовались методы анализа, перебора, сравнения и синтеза современных программных решений. Анализ функционирования графического интерфейса приложения для СТЗ проводился в 2020–2021 гг. в рамках приемочных испытаний технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 в производственных условиях ОАО «Остромечево» Брестской области.

Для анализа работы графического интерфейса создана лабораторная установка системы технического зрения, которая включала в себя: фотомодуль, состоящий из механического защищенного

⁴ Гвоздева Т. В., Баллод Б. А. Проектирование информационных систем. Стандартизация : учебное пособие. СПб. : Лань, 2019. 252 с. ; Купер А. Интерфейс. Основы проектирования взаимодействия ; пер. с англ. 4 изд. СПб. : Питер, 2017. 720 с.; Переверзева К. А. Графический интерфейс программного комплекса Экогис: модуль подготовки начальных данных // Труды института математики и информационных технологий Волгоградского государственного университета : сб. ст. Волгоград, 2021. С. 99–102.

⁵ Яблоки свежие поздних сроков созревания. Технические условия: СТБ 2288-2012. – Введ. 08.11.12. Минск : Госстандарт, 2012. 11 с.

корпуса 1 с видеокамерой 2 и структурированной подсветкой 3, защищенного электрического шкафа 4 с вычислительным модулем 5 и сенсорной панелью управления 6 (рис. 1).



Р и с. 1. Схема лабораторной установки системы технического зрения

Fig. 1. Scheme of the laboratory installation of the vision system

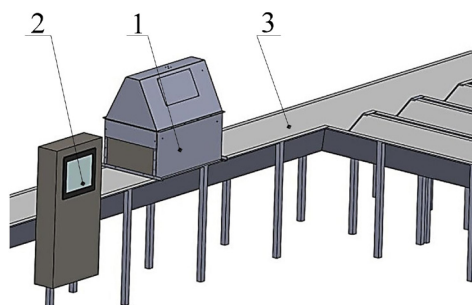
В качестве вычислительного модуля использовали промышленный компьютер фирмы CINCOSE серии DS-1200, оснащенный процессором Intel® Core™ i7-8700 Hexa-Core с тактовой частотой до 4600 МГц, оперативной памятью DDR4 объемом 16 ГБ и жестким диском типа SSD объемом 256 ГБ. На компьютере установлена операционная система Ubuntu (Linux). Управление вычислительным модулем осуществлялось посредством сенсорного промышленного монитора CV-110H/M1001.

Результаты исследования

Исследованиями установлено, что СТЗ должна состоять из оптического модуля с подсветкой и видеокамерой, электронного блока управления (ЭБУ) с исполнительными механизмами сортировщика и конвейера для плодов (рис. 2). При такой компоновке СТЗ оптический модуль располагается над конвейером, по которому транспортируются яблоки. Видеокамера оптического модуля фотографирует яблоки на конвейере

и передает полученные изображения в электронный блок управления, осуществляющий обработку полученных изображений.

При сортировке плодов по качеству, выполняемой СТЗ, осуществляются следующие процессы: подача плодов, их классификация и разделение.



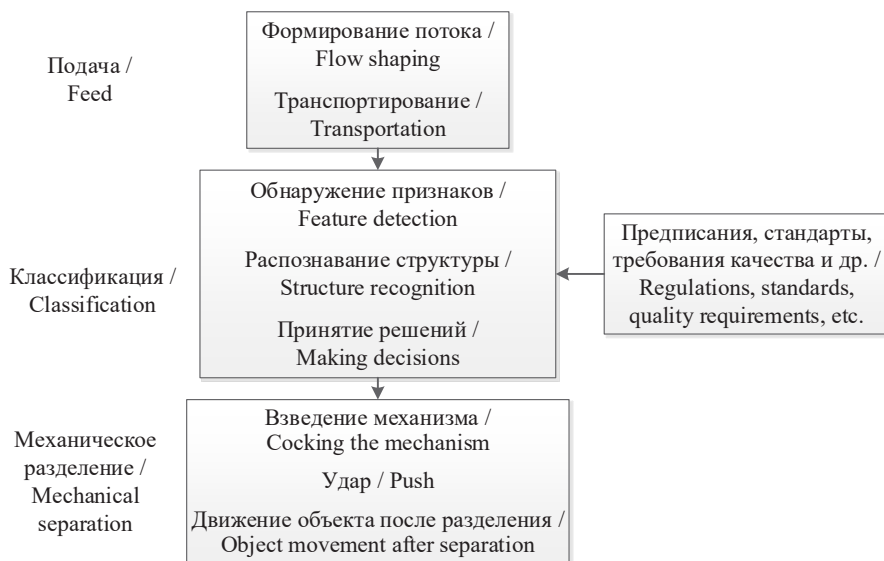
Р и с. 2. Общий вид системы технического зрения для сортировки плодов:

1 – оптический модуль; 2 – электронный блок управления; 3 – конвейер

Fig. 2. General view of the vision system for sorting fruits: 1 – optical module; 2 – electronic control unit; 3 – conveyor

Подачу плодов можно представить, как формирование потока и транспортирование, классификацию – как обнаружение признаков, распознавание структуры и принятие решений на основе заложенных в «память» предписаний, а процесс механизированного разделения – как подпроцессы взвода исполнительного механизма, удара и последующего движения объекта (рис. 3).

В известных линиях сортировки плодов процессы формирования потока и их транспортирование выполняются конвейерами, управление которых не связано с СТЗ. При этом обнаружение признаков, распознавание структуры и принятие решений на основе предписаний, стандартов и требований качества, а также управление исполнительными механизмами разделения потока плодов осуществляет ЭБУ СТЗ.



Р и с. 3. Функциональная схема системы сортировки плодов по качеству
F i g. 3. Functional diagram of the system for sorting fruits by quality

В соответствии с СТБ 2288-2012 яблоки по показателям качества разделяются на три товарных сорта: высший, первый и второй (табл. 1).

Как видно из таблицы 1 для принятия решения о качестве плодов ЭБУ СТЗ должен не только определить диаметр яблока, но и выявить его повреждения.

При этом если диаметр яблок можно определить исходя из геометрических размеров получаемых видеокамерой изображений, то механические повреждения и повреждения плодов болезнями и вредителями – только посредством применения аппарата глубокого обучения искусственной нейронной сети (ИНС). В основе ее функционирования положен принцип распознавания изображения плодов, которые система сравнивает с запрограммированными в память машины образами, получившими название «обучающая выборка»⁵.

Требования, предъявляемые к качеству плодов, определяются не только соответствующим стандартом, но и представлениями о нем потребителем и могут варьироваться в широких пределах. Кроме того, в процессе сортировки процентный выход плодов того или иного сорта зависит от множества факторов: сорта, условий хранения, качества плодов при закладке и др. Это приводит к тому, что занятость рабочих, фасующих отсортированные плоды (высшего, первого, второго сорта), может в значительной степени отличаться от прогнозируемой. Все это требует гибкости в управлении как СТЗ, так и машиной для сортировки плодов в целом.

Таким образом, программное обеспечение ЭБУ СТЗ должно обеспечивать выполнение следующих функций:

- ввод информации о заказе на сортировку плодов;

⁵ Tzutalin. LabelImg [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/HumanSignal/labelImg> (дата обращения: 29.03.2023); Юрин А. Н., Викторovich В. В., Кострома С. П. Снижение затрат труда применением системы технического зрения при сортировке яблок // Межведомственный тематический сборник «Механизация и электрификация сельского хозяйства». Минск : Беларуская навука, 2022. Вып. 55. С. 88–95.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Показатели качества сортирования яблок
Quality indicators of sorting apples

Наименование показателя / Name indicator	Характеристика и требования для сорта / Characteristics and requirements for the variety		
	высшего / higher variety	первого / first variety	второго / second variety
Наибольший размер плода, мм / The largest fruit size, mm	70–65	65–60	60–55
Механические повреждения / Mechanical damage			
– «градобоина» / “hail damage”	н/д* / not allowed	до 2 см ² / up to 2 cm ²	2 см ² –1/4 поверхности / 2 cm ² –1/4 surface
– «прокол», «порез», «нажим» / “puncture”, “cut”, “pressure”	н/д / not allowed	до 2 см ² / up to 2 cm ²	2–4 см ²
Повреждения вредителями / Pest damage	н/д / not allowed	до 2 см ² / up to 2 cm ²	2–4 см ²
Повреждения болезнями / Disease damage			
– «гниль» / “rot”		н/д / not allowed	
– «сетка» / “net”	н/д / not allowed	до 1/4 поверхности/ up to 1/4 surface	допускается/ allowed
– «парша» / “scab”	н/д / not allowed	до 2 см ² / up to 2 cm ²	2 см ² –1/4 поверхности / 2 cm ² –1/4 surface

Примечание / Note: * – не допускается / not allowed.

– настройку требований к качеству плодов;

– оперативное управление устройствами для выгрузки от сортированных плодов, для регулировки загруженности рабочих-фасовщиков;

– анализ работы СТЗ и машины для сортировки в целом;

– настройку ЭБУ, тестирование и анализ неисправностей.

В связи с этим было принято решение разделить меню графического приложения на пять основных модулей с расположением их в виде вкладок в порядке их применения при работе с СТЗ:

– «Заказ» – для ввода информации предмете сортировки;

– «Параметры» – для настройки параметров классификации яблок;

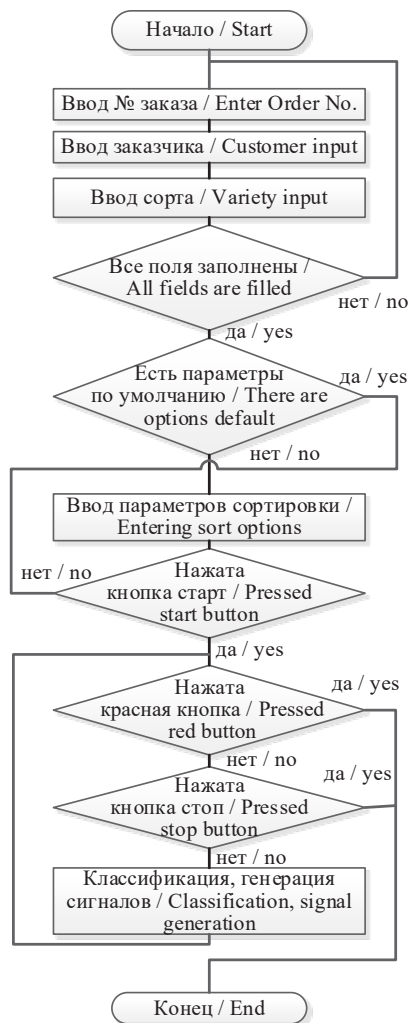
– «Статистика» – для отображения информации о процессе сортировки в режиме реального времени;

– «Лотки» – для распределения потоков отсортированных плодов по выходным конвейерам;

– «Инженерный» – для контроля над информационными и управляющими процессами СТЗ.

На основании данных функций разработан алгоритм работы программного обеспечения графического интерфейса СТЗ (рис. 4).

В представленной схеме первые три этапа предусматривают ввод информации о предстоящей работе: номер заказа, заказчик, сорт плодов. Эта информация необходима для формирования отчета о результатах проделанной работы.



Р и с. 4. Алгоритм работы графического интерфейса СТЗ

F i g. 4. Algorithm of the graphical interface of the VS

Отчет является рекомендательным документом. На его основе пользователь может получить следующую информацию:

- номер заказа;
- наименование заказчика;
- наименование исполнителя;
- дата и сроки выполнения заказа;
- сорт яблок;
- статистические данные полученного продукта, включая:

- 1) геометрические параметры яблок;
 - 2) список допустимых / недопустимых дефектов;
 - 3) плотность яблок;
 - 4) скорость движения конвейера;
- описание характеристик, на основе которых производилась классификация. Графическое изображение вкладки «Заказ» приведено на рисунке 5. Указанная вкладка содержит следующие информационные элементы:

– «№ заказа» – уникальное название для каждого заказа;

– «Заказчик» – уникальное имя заказчика;

– «Сорт» – название сорта яблок в формируемом заказе;

– «Исполнитель» – имя пользователя, осуществляющего настройку системы;

– «Ответственный» – имя пользователя, осуществляющего контроль за работой системы;

– «Дата» – данные о дате, используются для формирования отчета.

Оператор не сможет запустить процесс сортировки плодов без информации, заполненной во вкладках «Заказ» (номер заказа, наименование заказчика, наименование исполнителя, сорт), «Рецепт» (коэффициенты классификации яблок по сортам) и «Статистика» (плотность). Следует оговориться, что если перечисленные параметры удовлетворяют значениям, хранящимся «по умолчанию», то оператор может их не заполнять. Только после этого у оператора есть возможность нажать на кнопку «Старт», так как до этого момента она была в главном окне, но не активна.

Кроме того, для повышения безопасности функционирования СТЗ в алгоритм управления введена коман-

да прерывания выполнения процесса сортировки, активируемая кнопкой аварийной остановки (в дальнейшем – «красная» кнопка).

В соответствии с алгоритмом работы графического интерфейса СТЗ после ввода информации о заказе оператором СТЗ происходит настройка параметров классификации яблок посредством вкладки «Параметры» (рис. 6).

Для этого во вкладке использованы шесть «ползунков», по два на каждый из сортов, которые позволяют бесступенчато изменять диаметр, относящийся к соответствующему сорту плода.

Во вкладке имеются индикаторы, позволяющие блоку управления СТЗ учитывать те или иные дефекты плодов в каждом из трех сортов.

При этом, если в предыдущей вкладке «Заказ» был выбран сорт, использовавшийся уже в предыдущих сессиях, то указанные выше значения коэффициентов устанавливаются по последним значениям автоматически. Если яблоки, используемые в текущем заказе, в небольших пределах отличаются от значений, установленных по умолчанию (в связи со сменой поставщика или иных условий), то у оператора есть возможность их корректировки.

СОРТИРОВЩИК ЯБЛОК

ЗАКАЗ ПАРАМЕТРЫ СТАТИСТИКА ЛОТКИ ИНЖ-ЫЙ

№ ЗАКАЗА Новый заказ

ЗАКАЗЧИК

СОРТ.....

ИСПОЛНИТЕЛЬ 1: Калибровочный Пользователь

ОТВЕТСТВЕННЫЙ

ДАТА.....

Рецепт не подтвержден

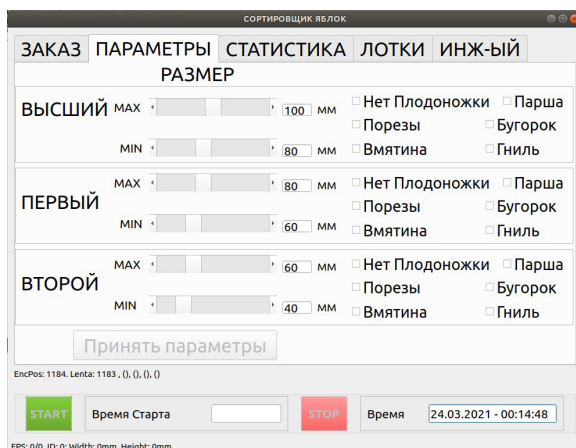
ЗАКРЫТЬ ЗАКАЗЫ

START СТОП

EncPos: 802, Lent: 801, (0, 0, 0, 0)

FPS: 0/0, ID: 0, Width: 0mm, Height: 0mm

Р и с. 5. Вкладка «Заказ»
F i g. 5. Order tab



Р и с. 6. Вкладка «Параметры»

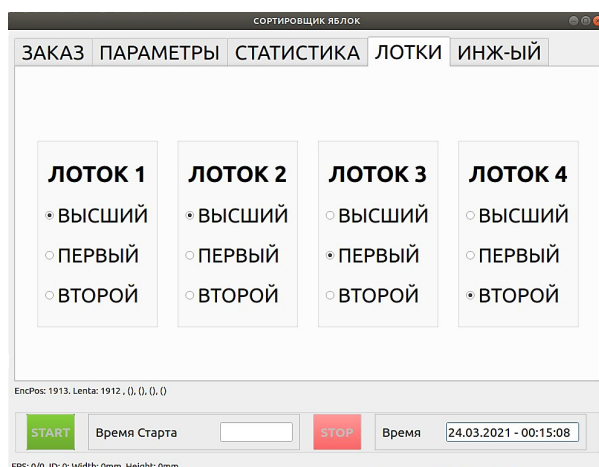
F i g. 6. Options tab

После завершения настройки качественных параметров сортировки яблок по сортам оператором назначаются выходные конвейеры для каждого из сортов яблок во вкладке «Лотки» (рис. 7).

При выполнении процесса сортировки плодов с частичным использованием ручного труда важным является контроль производительности сортировки на каждый сорт, что позволит в режиме реального времени контролировать ра-

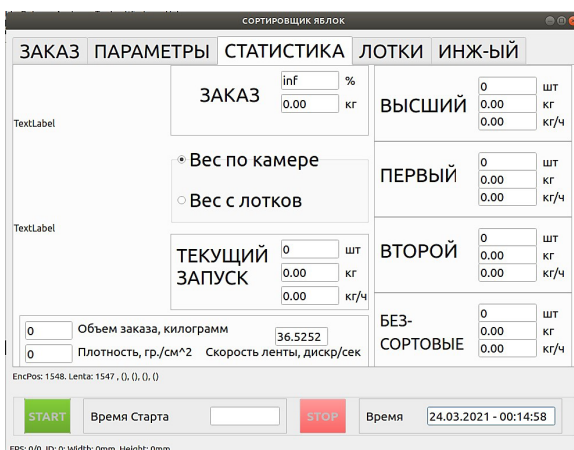
боту, определить точные сроки выполнения операции и выявить нарушения технологий уборки и хранения плодов. Для этого в графическом интерфейсе ЭБУ СТЗ использована вкладка «Статистика» (рис. 8).

В данной вкладке в режиме реального времени дается информация о производительности сортировки яблок как в целом, так и по отдельным сортам (в шт., кг и кг/ч).



Р и с. 7. Вкладка «Лотки»

F i g. 7. Trays tab



Р и с. 8. Вкладка «Статистика»

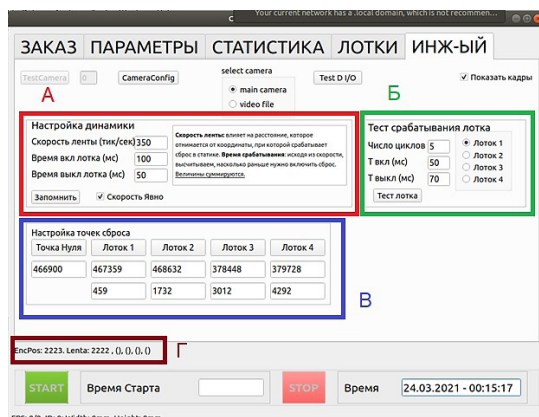
F i g. 8. Statistics tab

Анализ получаемой информации оператором из вкладки «Статистика» (рис. 8) графического меню позволяет определить, сколько плодов каждого сорта получается. Последняя информация необходима оператору для принятия решения о выделении дополнительного выходного транспортера для сорта, на котором объем поступающих отсортированных плодов значительно больше других (рис. 7).

Для настройки СТЗ контроля ее функционирования в ГПИ добавлена вкладка «Инженерный», представленная на рисунке 9.

Данная вкладка является служебной и предназначена для работы инженера, осуществляющего наладку ЭБУ. С помощью вложенных элементов меню и настроек наладчик имеет следующие возможности:

- сектор А – настройка срабатывания механизма сбрасывания яблок с ручным и автоматическим вводом скорости движения главного конвейера;
- сектор Б – тестирование и установление временных характеристик механизма разделения потока яблок;



Р и с. 9. Вкладка «Инженерный»

F i g. 9. Engineering tab

– сектор В – установка расстояний до места разделения потока яблок для каждого из выходных транспортеров;

– сектор Г – отображение ошибок срабатывания соленоидов сбрасывания яблок и очередности их работы для каждого из выходных транспортеров.

Обсуждение и заключение

Созданный графический интерфейс использован в системе технического зрения технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 (рис. 10), разработанной РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства».

Техническая характеристика технологической линии приведена в таблице 2.

Для оценки качества сортировки яблок СТЗ использовались метрики IoU и Accurasy.

Метрика Accurasy является величиной, обозначающей долю правильных ответов алгоритма, значение которой определялось по формуле:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}.$$

Метрика Intersection over Union (IoU) – величина, показывающая, насколько у двух объектов (эталонного и текущего) совпадает внутренняя площадь:

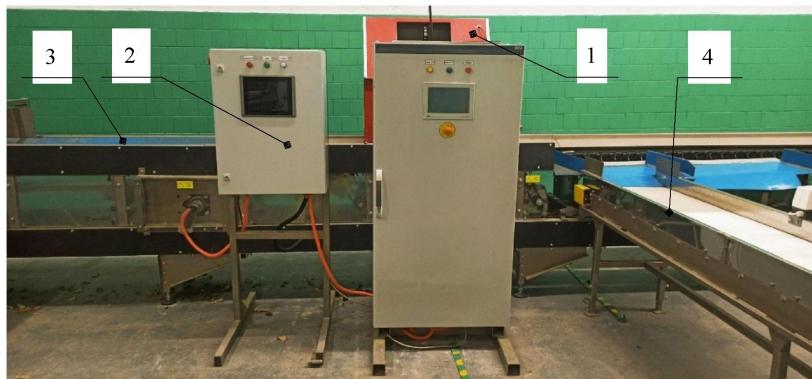
$$\text{IoU} = \frac{p\text{BB}}{t\text{BB}},$$

где tBB – реальная площадь объекта; pBB – площадь объекта, предсказанная детектором.

Значения метрики Accurasy при определении сорта яблок СТЗ приведены в таблице 3.

Приемочные испытания линии проходили в ОАО «Остромечево» в Брестском районе, аг. Остромечево в 2020–2021 годах⁶. Испытания линии сортировки яблок проводились в соответствии с ГОСТ Р 54780-2011 «Машины для товарной обработки плодов. Методы испытаний».

Определение качества сортировки яблок осуществлялось в соответствии с агротехническими требованиями, указанными в таблице 1.



Р и с. 10. Система технического зрения линии сортировки ЛСП-4:
1 – оптический модуль с видеокамерой и структурной подсветкой;
2 – электронный блок управления; 3 – конвейер;
4 – выходной транспортер для отсортированных плодов

F i g. 10. Vision system of sorting line LSP-4: 1 – optical module with a video camera and structural illumination; 2 – electronic control unit; 3 – conveyor;
4 – output conveyor for sorted fruits

⁶ Протокол приемочных испытаний линии технологической сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 от 25 февраля 2022 г. № 004-1/3-2022 / ИЦ ГУ «Белорусская МИС». п. Привольный, 2022. 99 с.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Техническая характеристика линии ЛСП-4
Technical characteristics of the line LSP-4

Наименование показателя / Name of indicator	Значение / Meaning
Количество отводящих конвейеров, шт. / Number of outfeed conveyors, pcs.	4
Скорость движения сортировальных кареток, м/с / Sorting carriage speed, m/s	0,10–0,78
Производительность за час основного времени, т* / Productivity per hour of main time, t*	2,5, не более / no more
Параметры, по которым осуществляется сортировка / Parameters by which sorting is carried out	размер, механические повреждения, повреждения от вредителей / size, mechanical damage, pest damage
Обслуживающий персонал, чел. / Service personnel, pers.	8
Допустимое отклонение по наибольшему диаметру яблок, находящихся в одной и той же таре, не более / Permissible deviation in the largest diameter of apples in the same container, no more	10 мм / mm

Примечание / Note: * – зависит от физических и структурно-механических свойств плодов / depends on the physical and structural-mechanical properties of the fruits.

Анализ результатов испытаний показал, что технологическая линия соответствует требованиям технического задания и обеспечивает качественное выполнение технологического процесса сортировки яблок по размеру и наличию дефектов от механических повреждений, болезней и вредителей. При этом точность сортировки плодов по размеру составила 75,4 %, а точность сортировки по размеру и наличию дефектов – 73,1 % (табл. 4).

Некоторое снижение точности сортирования по отношению к техническому

заданию объясняется наличием в сортируемых плодах большого количества яблок, имеющих значительные механические повреждения (более 20 % поверхности) и плодов с обширной гнилью, более 1/2 площади плода, присутствие которых не допускается.

При этом применение разработанного графического интерфейса позволило обеспечить производительность труда на сортировке в 1,76–1,80 т/ч или 225 кг/ч на одного человека, что в 3 раза выше производительности при ручной сортировке плодов⁷.

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Значения метрики Accuracy при определении сорта яблок нейронной сетью
Values of Accuracy metric when determining the variety of apples by a neural network

Сорт яблок / Apple variety	Accuracy
Высший / Higher	0,763
Первый / First	0,825
Второй / Second	0,851
Без сортовой / Without varietal	0,864

⁷ Организационно-технологические нормативы возделывания овощных, плодовых, ягодных культур и выращивания посевного материала : сборник отраслевых регламентов / В. Г. Гусаков [и др.]. Минск : Беларуская навука, 2010. 520 с.

Функциональные показатели и показатели работы линии
Functional performance and line performance

Наименование показателя / Name of indicator	Значение показателя / Indicator value	
	по ТЗ / according to ТК	по результатам испытаний / by test results
Повреждение продукции линией после сортировки, % / Damage to products by the line after sorting, %	10,0, не более / not more than	1,3
Точность сортирования, % / Sorting accuracy, %	80,0, не менее / not more than	73,1
Точность сортирования с допустимым отклонением по наибольшему диаметру, % / Sorting accuracy with maximum diameter tolerance, %	80,0, не менее / not more than	75,4
Эксплуатационно-технологические показатели: / Operational and technological indicators:		
Производительность за час основного времени, т/ч / Productivity per hour of main time, t/h	2,5, не более / not more than	1,80

Расчет экономических показателей использования линии сортировки яблок ЛСП-4 производился в сравнении с импортным аналогом – линией сортировки яблок «Rollerstar CV-C3 1-7+1» фирмы «Aweta», Голландия, по ТКП 151-2008 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей»⁸ с использованием нормативно-справочных материалов и действующих тарифных ставок оплаты труда механизаторов и стоимости топлива.

В результате расчета сравнительных показателей экономической эффективности при работе линии установлено, что годовой приведенный экономический эффект от применения линии составляет 2,9 млн. руб., а срок окупаемости – 4,59 года.

1. В результате исследований создано графическое приложение программного обеспечения ЭБУ СТЗ линии сортировки и фасовки яблок.

2. Графический интерфейс пользователя системы технического зрения содержит все необходимые инструменты («Заказ», «Параметры», «Статистика», «Лотки» и «Инженерный») для управления и оптимизации затрат при сортировке яблок на три товарных сорта.

3. Приемочные испытания линии сортировки плодов ЛСП-4, которая оснащена системой технического зрения с разработанным программным обеспечением и графическим интерфейсом, показали ее высокую производительность труда в 3 раза превышающую таковую при ручной сортировке плодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Кутырев А. И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 35–41. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>

⁸ ТКП 151-2008 «Сельскохозяйственная техника. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей».

2. Разработка методов мультиспектральной дифференциации природных и синтетических материалов на основании спектральных характеристик диффузного отражения / Ш. З. Ловпаче [и др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 10. С. 11–17. URL: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-10-2021-11-17.pdf> (дата обращения: 29.03.2023).

3. Казакевич П. П., Юрин А. Н., Прокопович Г. А. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. 2021. Т. 59, № 4. С. 488–500. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>

4. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе / Д. О. Хорт [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. № 1. С. 133–141. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141>

5. Коваленко Т. А., Солодов А. Г. Игровой интерфейс, как объект исследования // The Scientific Heritage. 2020. № 45-1 (45). С. 36–42. EDN: ZJQNAN

6. Кудрявцев М. А. Методика измерения сложности восприятия графического интерфейса пользователя // Современные инновации. 2017. № 4 (18). С. 10–12. EDN: YKRBCF

7. Дудник М. Д. Разработка пользовательских интерфейсов программного обеспечения для анализа данных: обзор существующих подходов // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2022. № 2. С. 23–28. URL: http://publish.sutd.ru/docs/content/vestnik_mu_2_2022.pdf (дата обращения: 29.03.2023).

8. Федорова С. В. Определение многокритериального показателя качества графического интерфейса программно-аппаратного комплексного комплекса связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13, № 3. С. 20–27. <https://doi.org/10.36724/2409-5419-2021-13-3-20-27>

9. Тиханычев О. В. Пользовательские интерфейсы в автоматизированных системах: проблемы разработки // Программные системы и вычислительные методы. 2019. № 2. С. 11–22. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2019.2.28443>

10. Назаренко Н. А., Падерно П. И. Влияние интерфейса на состояние и здоровье оператора // Биотехносфера. 2009. № 6 (6). С. 45–52. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-interfeysana-sostoyaniya-i-zdorovie-operatora/viewer> (дата обращения: 29.03.2023).

11. Конюхова О. В. Модель системы управления интерфейсом пользователя для разработки пользовательских интерфейсов графических редакторов // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. 2004. № 5 (6). С. 82–86. URL: <https://oreluniver.ru/science/journal/isit/archive?p=11> (дата обращения: 29.03.2023).

12. Хорт Д. О., Кутырев А. И., Филиппов Р. А. Система компьютерного зрения для распознавания ягод земляники садовой // Новости науки в АПК. 2019. № 3 (12). С. 308–313. <https://doi.org/10.25930/2218-855X/080.3.12.2019>

13. Разработка навесной системы для управления пропашным культиватором в автоматическом режиме / В. В. Азаренко [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. 2021. Т. 59, № 2. С. 232–242. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242>

14. Горонков К. А., Руденко О. В., Усатиков С. В. База данных обучающей выборки для высокоточного распознавания плоских изображений сортов злаковых и масличных культур // Фундаментальные исследования. 2011. № 8–2. С. 342–346. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=27960> (дата обращения: 29.03.2023).

15. Истратова Е. Е., Пустовских Д. А. Разработка и исследование биометрической системы распознавания лиц на основе применения метода глубокого обучения // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 12. С. 66–74. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-issledovanie-biometricheskoj-sistemy-raspoznavaniya-lits-na-osnove-primeneniya-metodaglubokogo-obucheniya/viewer> (дата обращения: 29.03.2023).

16. Арефьев Р. А., Зудилова Т. В. SOA паттерн проектирования пользовательских интерфейсов для мультиплатформенных приложений // Программные системы и вычислительные методы. 2016. № 2. С. 201–209. <https://doi.org/10.7256/2305-6061.2016.2.18627>

17. Tsai W. T., Shao Q., Li W. Service-oriented user interface modeling and composition // e-Business Engineering, 2008. ICEBE'08. IEEE International Conference on. IEEE, 2008. С. 21–28. <https://doi.org/10.1109/SOCA.2010.5707139>

18. Building Multi-platform User Interfaces with UIML / M. F. Ali [et al.] // Computer-Aided Design of User Interfaces III. Springer Netherlands, 2002. P. 255–266. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0111024>

19. Ganganagowdar N. V., Gundad A. V. Intelligent Computer Vision System for Vegetables and Fruits Quality Inspection Using Soft Computing Techniques // *Agricultural Engineering International*. 2019. Vol. 21, issue 3. P. 171–178. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5188> (дата обращения: 29.03.2023).
20. Gauch S., Chaffee J., Pretschner A. Ontology-based Personalized Search and Browsing. *Web Intelligence and Agent Systems*, 1, 2003. P. 219–234. URL: https://www.researchgate.net/publication/220298562_Ontology-based_personalized_search_and_browsing (дата обращения: 29.03.2023).

Поступила 30.03.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 26.07.2023.

Об авторах:

Казакевич Петр Петрович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 66), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9102-2816>, oan2011@mail.ru

Юрин Антон Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства» (220049, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Кнорина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9348-8110>, anton-jurin@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

П. П. Казакевич – научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

А. Н. Юрин – концепция исследований, реализация исследований, написание исходного текста, итоговые выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

REFERENCES

1. Smirnov I.G., Hort D.O., Kutyrev A.I. Intelligent Technology and Robotic Horticulture Machines. *Agricultural Machines and Technologies*. 2021;15(4):35–41. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
2. Lovpache Sh.Z., Mamelin Yu.V., Sinita S.G., Buzko V.Yu., Mamelina A.S. Development of Methods for Multispectral Differentiation of Natural and Synthetic Materials Based on the Spectral Characteristics of Diffuse Reflection. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2021;(10):11–17. Available at: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-10-2021-11-17.pdf> (accessed 29.03.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kazakevich P.P., Yurin A.N., Prokopovich G.A., Technical Perspective System of Apple Defects: Substantiation, Development, Verification. *Ves. National Acad. Sciences of Belarus. Ser. Agrarian Sciences*. 2021;59(4):488–500. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>
4. Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Filippov R.A., Vershinin R.V. Development of Algorithms for a System of Rich Berries of Garden Strawberries with Robotic Picking. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-industrial Complex*. 2020;(1):133–141. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141>
5. Kovalenko T., Solodov A. Game Interface as an Object of Study. *The Scientific Heritage*. 2020;(45-1):36–42. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/igrovoy-interfeys-kak-obekt-issledovaniya/viewer> (accessed 04.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kudryavtsev M.A. Methodology for Measuring the Complexity of Perception of the Graphical User Interface. *Modern Innovations*. 2017;(4):10–12. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniya-slozhnosti-vospriyatya-graficheskogointerfeysa-polzovatelya/viewer> (accessed 04.04.2022). (In Russ.)
7. Dudnik M.D. Design of User Interfaces for Data Analysis Software: Overview of Existing Approaches. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design*. 2022;(2):23–28. Available at: http://publish.sutd.ru/docs/content/vestnik_mu_2_2022.pdf (accessed 29.03.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Fedorova S.V. Determination of a Multi-Criteria Indicator of the Quality of the Graphical Interface of the Hardware-Software Complete Communication Complex. *H&ES Research*. 2021;13(3):20–27. <https://doi.org/10.36724/2409-5419-2021-13-3-20-27>

9. Tikhanychev O.V. User Interfaces in Automatic Sources: Development Problems. *Software Systems and Computational Methods*. 2019;(2):11–22. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2019.2.28443>
10. Nazarenko N.A., Paderno P.I. Influence of Appearance on the Condition and Health of the Operator. *Biotechnosfera*. 2009;(6):45–52. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-interfeysa-na-sostoyanie-i-zdorovie-operatora/viewer> (accessed 29.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Konyukhova O.V. Model of the User Interface Management System for the Development of User Interfaces for Graphic Editors. *Bulletin of the Oryol State Technical University. Series: Information Systems and Technologies*. 2004;(5):82–86. Available at: <https://oreluniver.ru/science/journal/isit/archive?p=11> (accessed 29.03.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Hort D.O., Kutyrev A.I., Filippov R.A. Computer Vision System for Recognition Strawberries. *Novosti nauki v APK*. 2019;(3):308–313. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25930/2218-855X/080.3.12.2019>
13. Azarenko V.V., Komlach D.I., Goldyban V.V., Baranovsky I.A., Prokopovich G.A. Development of a Hinged System for Controlling a Row Cultivator in Automatic Mode. *Weight. National Acad. Sciences of Belarus. Ser. Agrarian Sciences*. 2021;59(2):232–242. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242>
14. Goronkov K.A., Rudenko O.V., Usatkov S.V. Database of the Training Sample for High-Precision Recognition of Flat Images of Cereal and Oilseed Varieties. *Fundamental Research*. 2011;(8):342–346. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=27960> (accessed 29.03.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Istratova E.E., Pustovskikh D.A. Development and Research of a Biometric Face Recognition System Based on the Application of the Deep Learning Method. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;10(12):66–74. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-issledovanie-biometricheskoy-sistemy-raspoznavaniya-lits-na-osnove-primeneniya-metoda-glubokogo-obucheniya/viewer> (accessed 29.03.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Arefiev R.A., Zudilova T.V. SOA Design Pattern for User Interfaces for Multiplatform Applications. *Software Systems and Computational Methods*. 2016;(2):201–209. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.7256/2305-6061.2016.2.18627>
17. Tsai W. T., Shao Q., Li W. Service-Oriented User Interface Modeling and Composition. In: *eBusiness Engineering*, 2008. ICEBE'08. IEEE International Conference on. IEEE; 2008. P. 21–28. <https://doi.org/10.1109/SOCA.2010.5707139>
18. Ali M.F., Perez-Quinones M.A., Shell E., et al. Building Multi-Platform User Interfaces with UIML. *Computer-Aided Design of User Interfaces III*. Springer Netherlands; 2002. Pp. 255–266. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0111024>
19. Ganganagowdar N.V., Gundad A.V. Intelligent Computer Vision System for Vegetables and Fruits Quality Inspection Using Soft Computing Techniques. *Agricultural Engineering International*. 2019;21(3):171–178. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5188> (accessed 29.03.2023).
20. Gauch S., Chaffee J., Pretschner A. Ontology-Based Personalized Search and Browsing. *Web Intelligence and Agent Systems*. 2003;(1):219–234. Available at: https://www.researchgate.net/publication/220298562_Ontology-based_personalized_search_and_browsing (accessed 29.03.2023).

Submitted 30.03.2023; revised 24.04.2023; accepted 26.07.2023.

About the authors:

Petr P. Kazakevich, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Corresponding Member, Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66 Nezavisimosti Ave., Minsk 220072, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9102-2816>, oan2011@mail.ru

Anton N. Yurin, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Head of Laboratory, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization (1 Knorina St., Minsk 220049, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9348-8110>, anton-jurin@rambler.ru

Authors contribution:

P. P. Kazakevich – scientific management, revision of the text, final conclusions.

A. N. Yurin – concept of the research, research implementation, text writing, final conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 62-82:532.5

doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.373-387

Оригинальная статья



Влияние марок гидравлических масел на полноту и точность диагностирования гидроагрегатов российского и зарубежного производства

П. А. Ионов¹, П. В. Сенин¹, А. М. Земсков¹✉,
С. В. Пьянзов¹, В. В. Салмин²

¹ *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
(г. Саранск, Российская Федерация)*

² *Пензенский государственный университет
(г. Пенза, Российская Федерация)*

✉ zam503@mail.ru

Аннотация

Введение. Заводы-изготовители российских и зарубежных объемных гидроприводов рекомендуют использовать для своих гидроагрегатов гидравлические масла (рабочую жидкость) определенных производителей: Lukoil, Gazpromneft, Mobil, Hydrau Gard, SHELL, Total и др. Масла имеют различные физико-химические свойства из-за различного набора присадок в своем составе. Однако изменения данных свойств в процессе эксплуатации являются негативным фактором. В связи с этим физико-химические свойства рабочей жидкости будут оказывать влияние на определение параметров диагностирования, а именно на их точность и достоверность. Поэтому в стендовом оборудовании при контроле технического состояния объемных гидроприводов необходимо использовать гидравлическое масло, которое будет обеспечивать постоянство физико-химических свойств. Для выбора рабочей жидкости, позволяющей определять параметры диагностирования новых и имеющих наработку объемных гидроприводов российского и зарубежного производства с минимальной погрешностью, необходимо проведение экспериментальных исследований.

Цель статьи. Определить закономерности изменения параметров диагностирования новых и имеющих наработку гидроагрегатов российского и зарубежного производства в зависимости от температуры рабочей жидкости.

Материалы и методы. В качестве рабочей жидкости использовались гидравлические масла МГЕ-46В и SHELL TELLUS S2 V46, рекомендованные заводами-изготовителями для объемных гидроприводов ГСТ-90, ГСТ-112 и Danfoss Power Solutions серии 90 соответственно. За анализируемые параметры диагностирования были

© Ионов П. А., Сенин П. В., Земсков А. М., Пьянзов С. В., Салмин В. В., 2023



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

приняты объемный КПД и крутящий момент, развиваемые объемными гидроприводами в процессе эксперимента. Испытания проводили на специализированном стендовом оборудовании в соответствии с требованиями (методикой) заводов-изготовителей. *Результаты исследования.* Экспериментальные исследования показали, что изменение температуры рабочей жидкости оказывает значительное влияние на точность диагностируемых параметров исследуемых гидроагрегатов. Установлено, что рабочая жидкость SHELL TELLUS S2 V46 позволяет достоверно определять диагностические параметры новых и имеющих наработку российских гидроагрегатов. Для рабочей жидкости МГЕ-46В получены оптимальные температурные диапазоны, равные 60...69 °С, при испытании новых и имеющих наработку зарубежных гидроагрегатов Danfoss Power Solutions серии 90.

Обсуждение и заключение. Установлено, что рабочая жидкость МГЕ-46В в оптимальных температурных диапазонах позволяет обеспечить полноту диагностирования новых и имеющих наработку российских и зарубежных гидроагрегатов с высокой точностью в соответствии с требованиями ГОСТ 17108 и заводов-изготовителей. Поэтому данное гидравлическое масло можно применять как универсальную рабочую жидкость для контроля технического состояния разномарочных гидроагрегатов на ремонтных предприятиях.

Ключевые слова: объемный гидропривод, техническое состояние, гидронасос, гидромотор, рабочая жидкость, тормозной момент, параметры диагностирования, стенд, температура

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Для цитирования: Влияние марок гидравлических масел на полноту и точность диагностирования гидроагрегатов российского и зарубежного производства / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 373–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.373-387>

Original article

Influence of Hydraulic Oil Brands on the Completeness and Accuracy of Diagnostics of Hydraulic Units of Russian and Foreign Production

P. A. Ionov^a, P. V. Senin^a, A. M. Zemskov^a✉, S. V. Pyanzov^a, V. V. Salmin^b

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

^b *Penza State University (Penza, Russian Federation)*

✉ zam503@mail.ru

Abstract

Introduction. Russian and foreign manufacturers of volumetric hydraulic drives recommend using hydraulic oils (working fluid) from certain manufacturers for their hydraulic units: Lukoil, Gazpromneft, Mobil, Hydrau Gard, SHELL, Total, etc. The oils have different physicochemical properties, because of different additive packages in their composition. However, changes in these properties during operation are a negative factor. In this regard, the physicochemical properties of the power fluid will affect the determination of diagnostic parameters, namely their accuracy and reliability. Therefore, when monitoring the technical condition of volumetric hydraulic drives in bench equipment, it is necessary to use hydraulic oil, with

constant physico-chemical properties. To select power fluid for determining the parameters of diagnosing new and existing volumetric hydraulic drives of Russian and foreign production with a minimum error, it is necessary to conduct experimental studies.

Aim of the Article. The study was aimed at determining the dependence of changes in the parameters of diagnosing new and operating hydraulic units of Russian and foreign production on the power fluid temperature.

Materials and Methods. As power fluid there were used Hydraulic oils MGE-46B and SHELL TELLUS S2 V46 recommended by manufacturers for volumetric hydraulic drives HST-90, HST-112 and Danfoss Power Solutions 90-series respectively. During the experiment, the volume efficiency and torque of volumetric hydraulic drives were tested as diagnostic parameters. The tests were carried out on specialized bench equipment in accordance with the requirements (methodology) of the manufacturers.

Results. Experimental studies presented in the article have shown that the changes in the temperature of the power fluid affect significantly the accuracy of the diagnosed parameters of hydraulic units under study. It was found that the power fluid SHELL TELLUS S2 V46 allows reliably determining the diagnostic parameters of new and having operating time domestic hydraulic units. Optimal temperature ranges equal to 60...69 °C were obtained for power fluid – MGE-46V when testing new and having operating time foreign hydraulic units Danfoss Power Solutions 90-series.

Discussion and Conclusion. It has been found that the power fluid MGE-46B in optimal temperature ranges ensures the completeness and high accuracy of diagnosing new and having operating time hydraulic units of Russian and foreign production in accordance with the requirements of GOST 17108 and manufacturers. Therefore, this hydraulic oil can be used as a universal power fluid for monitoring the technical condition of various hydraulic units at repair enterprises.

Keywords: volumetric hydraulic drive, technical condition, hydraulic pump, hydraulic motor, power fluid, braking torque, diagnostic parameters, stand, temperature

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

Acknowledgments: The authors would like to thank the anonymous reviewers.

For citation: Ionov P.A., Senin P.V., Zemskov A.M., Pyanzov S.V., Salmin V.V. Influence of Hydraulic Oil Brands on the Completeness and Accuracy of Diagnostics of Hydraulic Units of Russian and Foreign Production. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):373–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.373-387>

Введение

В гидравлических системах объемных гидроприводов в качестве рабочей жидкости (РЖ) применяется гидравлическое масло, что обеспечивает безотказную работу и преждевременный износ его деталей [1–3]. Выбор РЖ осуществляется с учетом требований заводоизготовителей объемных гидроприводов¹.

Основными производителями российских и зарубежных РЖ являются

Lukoil, Gazpromneft, Bashneft, Rosneft, SHELL, Mobil, Hydrau Gard, Castrol, Total и другие². Данные масла имеют различные физико-химические свойства из-за разнообразного набора присадок в своем составе (антикоррозионных, антиокислительных, противоизносных, загущающих и т. д.)³. Поэтому актуальной задачей является выбор РЖ, которая будет использоваться в стендовом оборудовании для диагностики новых

¹ ОАО «Пневмостроймашина». Каталог гидравлического оборудования. Екатеринбург, 2018. 52 с.; Technical Information Axial Piston Pumps Series 90. Sauer-Danfoss Company. Germany, March 2016. 91 p.;

² Масло гидравлическое МГЕ-46В [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oilright.ru/?item=104&page=catalogitem> (дата обращения: 10.05.2023); Гидравлическое масло Shell Tellus S2 V46 [Электронный ресурс]. URL: <https://market.shell/product/gidravlichesкое-maslo-shell-tellus-s2-v-46-20-1/> (дата обращения: 10.05.2023).

³ ГОСТ 17108-86. Гидропривод объемный и смазочные системы. Методы измерения параметров [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200013746> (дата обращения: 10.05.2023); Technical Information Axial Piston Motors Series 90. Sauer-Danfoss Company. Germany, January 2017. 32 p.

и имеющих наработку объемных гидроприводов российского и зарубежного производства [4; 5].

Перечислим основные критерии выбора РЖ для достоверного контроля технического состояния объемных гидроприводов в условиях ремонтного производства.

Во-первых, заводы-изготовители объемных гидроприводов в качестве РЖ рекомендуют применять гидравлические масла с разными характеристиками: для российских гидроагрегатов – МГЕ-46В по ГОСТ 17479.3-85 (используется при рабочем давлении до 35 МПа, с кратковременным повышением до 42 МПа), для зарубежных гидроагрегатов – *Hydrau Gard 46 Plus* или *SHELL TELLUS S2 V46* по ISO-11158 (используются при рабочем давлении до 42 МПа, с кратковременным повышением до 48 МПа) [6; 7].

Во-вторых, стендовое оборудование будет использовано для контроля технического состояния российских и зарубежных объемных гидроприводов, параметры диагностирования которых различны [8; 9].

В-третьих, стендовые испытания гидроагрегатов, по требованиям заводов-изготовителей, проводятся при следующих температурах РЖ: для МГЕ-46В – 50 ± 5 °С, для *SHELL TELLUS S2 V46* – 80 ± 5 °С, однако вязкость при этом значительно изменяется и приводит к снижению точности определения параметров диагностирования [10–12].

Цель исследования – определить закономерности изменения параметров диагностирования новых и имеющих наработку гидроагрегатов российского и зарубежного производства от температуры РЖ.

Обзор литературы

В работах [13; 14] представлено исследование влияния температуры гидравлического масла на производительность шестеренного насоса. Исследования заключались в определении объемной

подачи насоса при различных температурах гидравлического масла, для условий переменной скорости и давления. Наиболее эффективная работа шестеренного насоса обеспечивается до температуры 60 °С. Данные исследования позволяют определить только условия применения шестеренных насосов в гидравлических системах машин.

В научной статье [15] представлены исследования связи вязкости всесезонных гидравлических масел с производительностью гидравлических насосов. Определены внутренние потери потока гидравлической жидкости в гидронасосе, гидромоторе, регуляторе потока и предохранительном клапане при различных значениях давления, частоты вращения и температуры. Результаты исследований показали, что вязкость всесезонных гидравлических масел линейно снижается на протяжении всего периода испытаний. Однако внутренние потери потока в гидронасосе не показали статистически значимого увеличения при снижении вязкости. Кроме того, снижения крутящего момента и входной мощности гидравлических насосов являются более значимыми показателями всесезонных гидравлических масел, чем производительность.

В работах [16; 17] описаны результаты использования гидравлических масел с наночастицами оксида цинка ZnO для прогнозирования вязкости. Согласно лабораторным результатам, в температурном диапазоне от 25...50 °С и концентрациях наночастиц в диапазоне 0,125...1,5 % наблюдается увеличение коэффициента теплопередачи. Из результатов следует, что оптимальной является объемная концентрация ZnO – 1 %, при которой коэффициент тепловых характеристик увеличивается с повышением температуры и имеет максимальное значение. Однако отсутствуют данные применения данного гидравлического масла с наночастицами в объемном гидроприводе.

Исследования по подбору вязкостных присадок для гидравлических масел методом проведения экспериментов и обработки полученных результатов представлены в работах [18–20]. Определялось оптимальное содержание присадки для получения масел уровней вязкости *ISO VG 32* и *ISO VG 46*. Установлено, что высокая гидравлическая эффективность наблюдается при числах Рейнольдса от 500 000 до 700 000. Увеличение концентрации присадки более 40 частей на объем снижает эффективность, что связано с возникновением турбулентного потока. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях по разработке гидравлических масел уровня *HVLP*.

Таким образом, из проведенного анализа представленных работ и [21; 22] можно сделать вывод, что ни одно из представленных исследований не позволяет достигнуть заявленной цели. Поэтому предлагается провести собственные стендовые испытания новых и бывших в эксплуатации гидроагрегатов российского (ГСТ-90) и зарубежного (*Danfoss Power Solutions* серии 90) производства с рекомендованными гидравлическими маслами. Данные исследования позволяют определить закономерности изменения

параметров диагностирования от марки и температуры гидравлических масел.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на стендовом специализированном оборудовании, разработанном авторским коллективом МГУ им. Н. П. Огарева [2; 23].

На первом этапе было определено влияние свойств РЖ на параметры диагностирования широко представленных в Республике Мордовия гидроагрегатов российского (ГСТ-90, ГСТ-112) и зарубежного (*Danfoss Power Solutions*) производства, которые используются для сельскохозяйственной, дорожно-строительной и другой техники [24].

В качестве РЖ применяли гидравлические масла МГЕ-46В [6] и *SHELL TELLUS S2 V46* [7], рекомендованные заводами-изготовителями объемных гидроприводов. Физико-химические характеристики рекомендованных гидравлических масел рассмотрены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что кинематическая вязкость представленных гидравлических масел при увеличении температуры от +40 до +100 °С уменьшается: для РЖ МГЕ-46В – на 85 %; для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* – на 83 %.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Физико-химические характеристики гидравлических масел
Physico-chemical characteristics of hydraulic oils

Свойство / Features	МГЕ-46В / MGE-46B	Shell Tellus S2 V46
Класс вязкости по ISO / Viscosity class according to ISO	46,0	46,0
Тип жидкости по ISO / Type of liquid according to ISO	HH/HL	HV
Кинематическая вязкость, мм ² /с / Kinematic viscosity, mm ² /s		
0°С	639,0	600,0
+40°С	41,4...50,6	46,0
+100°С	7,0	7,9
Индекс вязкости / Viscosity index	90,0	143,0
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	875,0	872,0
Температура воспламенения, °С / Ignition temperature, °С	190,0	225,0
Температура замерзания, °С / Freezing point, °С	-32,0	-36,0

Физический показатель «индекс вязкости РЖ» определяет значение вязкости от температуры. То есть данный индекс для МГЕ-46В имеет наименьшее значение, а для *SHELL TELLUS S2 V46* – наибольшее соответственно. Благодаря этому РЖ производства *SHELL* в процессе стендовых испытаний обеспечит определение параметров диагностирования с большей точностью и достоверностью.

Дальнейшие исследования авторов были направлены на определение степени влияния величины температуры РЖ и на параметры диагностирования новых и имеющих наработку гидроагрегатов российского и зарубежного производства. За анализируемые параметры диагностирования принимали объемный КПД и крутящий момент, развиваемые объемными гидроприводами в процессе эксперимента.

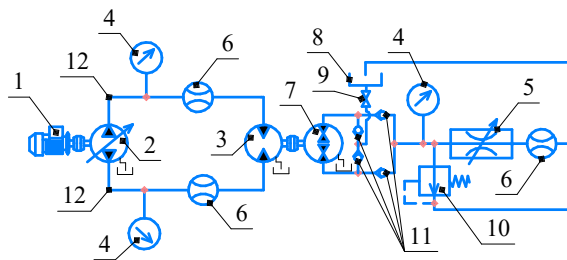
Для этого были подготовлены комплекты объемных гидроприводов ГСТ-90 [8] и *Danfoss Power Solutions* серии 90 [9], технические характеристики которых удовлетворяли требованиям заводов-изготовителей. Испытания объемных гидроприводов на стендовом оборудовании проводили, согласно гидравлической схеме, представленной на рисунке 1.

В процессе испытания контролировали следующие параметры, развиваемые гидроагрегатами объемного гидропривода: частоту вращения (об/мин); давление в линиях управления и нагнетания (МПа); подачу и расход (л/мин) в линиях нагнетания; температуру (°С) РЖ; выходной крутящий момент (Н·м); объемный КПД.

Испытания проводили при номинальных значениях частоты вращения и давления в линии нагнетания гидроагрегатов в соответствии с требованиями заводов-изготовителей. Переменными в эксперименте принимались такие параметры объемного гидропривода, как давление в линиях нагнетания и управления; частота вращения приводных валов, подача (расход) РЖ.

Исследования начинали от минимального значения температуры РЖ в линиях нагнетания, установленного заводами-изготовителями объемного гидропривода +45 °С с последующим пошаговым увеличением +5 °С до максимального значения +85 °С.

Для ГСТ-90 и ГСТ-112 эксперимент проводили при температуре РЖ от +45...+55 °С до +85 °С [8]. Для объемного гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90 эксперимент проводили при



Р и с. 1. Гидравлическая схема стендового оборудования: 1 – электродвигатель; 2 и 3 – испытуемые гидронасос и гидромотор объемного гидропривода; 4 – манометры; 5 – дроссель; 6 – расходомеры; 7 – гидронасос гидравлического нагружающего устройства; 8 – гидробак гидравлического нагружающего устройства; 9 – вентиль; 10 и 11 – предохранительный и обратные клапаны; 12 – линии нагнетания

Fig. 1. Hydraulic scheme of bench equipment: 1 – electric motor; 2 and 3 – tested hydraulic pump and hydraulic motor of volumetric hydraulic drive; 4 – pressure gauges; 5 – throttle; 6 – flow meters; 7 – hydraulic pump of hydraulic loading device; 8 – hydraulic tank of hydraulic loading device; 9 – valve; 10 and 11 – safety and check valves; 12 – discharge lines

температуре РЖ от +60 °С до +85 °С [9]. Заводом-изготовителем за критерий предельного состояния гидроагрегатов принято снижение величины объемного КПД от 20 % [4; 5].

Результаты исследования

Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в таблице 2, а также на рисунках 2 и 3.

Анализ таблицы 2 показал, что в рабочем диапазоне температур +45...+55 °С объемный КПД новых гидронасосов ГСТ-90 при стендовых испытаниях с РЖ МГЕ-46В составляет 0,954...0,952, для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* – 0,958...0,956 (снижение на 0,2 %).

Крутящий момент новых гидромоторов ГСТ-90 при той же температуре находится в диапазонах 324...322 Н·м (снижение на 0,62 %) для гидравлического масла МГЕ-46В и 325...324 Н·м (снижение на 0,3 %) для *SHELL TELLUS S2 V46* соответственно.

Испытания имеющих наработку гидронасосов и гидромоторов показали, что для РЖ МГЕ-46В объемный КПД гидронасоса составляет 0,73...0,7 (снижение на 3,6 %), крутящий момент гидромотора при этом составляет 317...310 Н·м (снижение на 2,2 %), для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* объемный КПД составляет 0,72...0,71 (снижение на 1,4 %), крутящий момент гидромотора составляет 317...314 Н·м (снижение на 0,96 %).

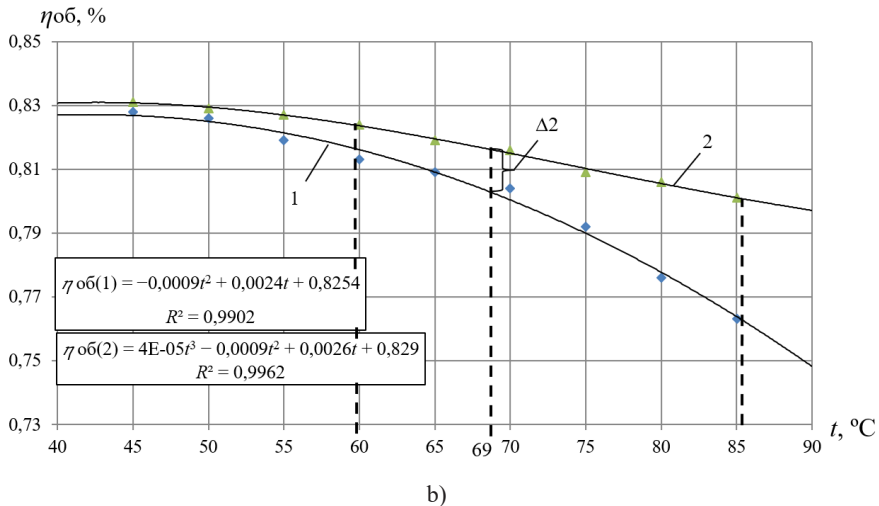
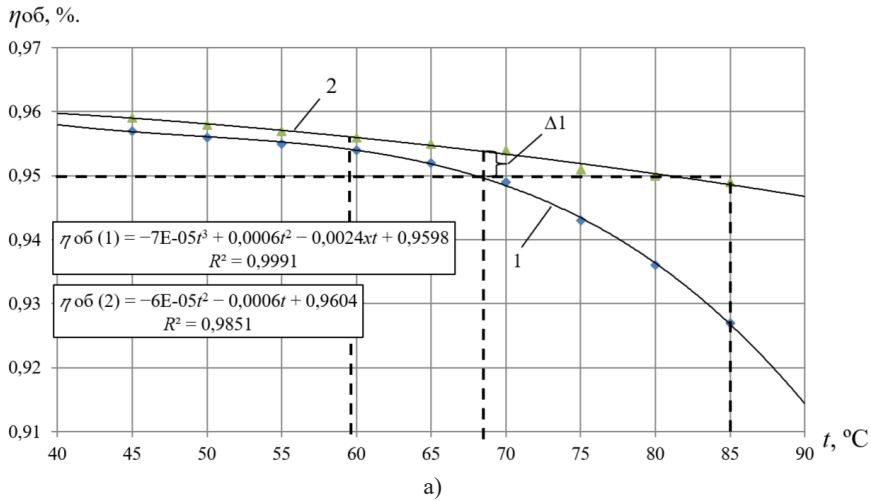
Следовательно, наибольшая погрешность определения объемного КПД и крутящего момента для новых и имеющих наработку гидронасосов и гидромоторов ГСТ-90 с учетом температуры +55 °С достигается для РЖ МГЕ-46В в первом случае 0,2 % и 0,62 %, во втором – 2,2 % и 3,6 %. Поэтому РЖ зарубежного производителя *SHELL* в процессе стендовых испытаний обеспечит определение параметров диагностирования гидроагрегатов с большей достоверностью.

Таблица 2

Table 2

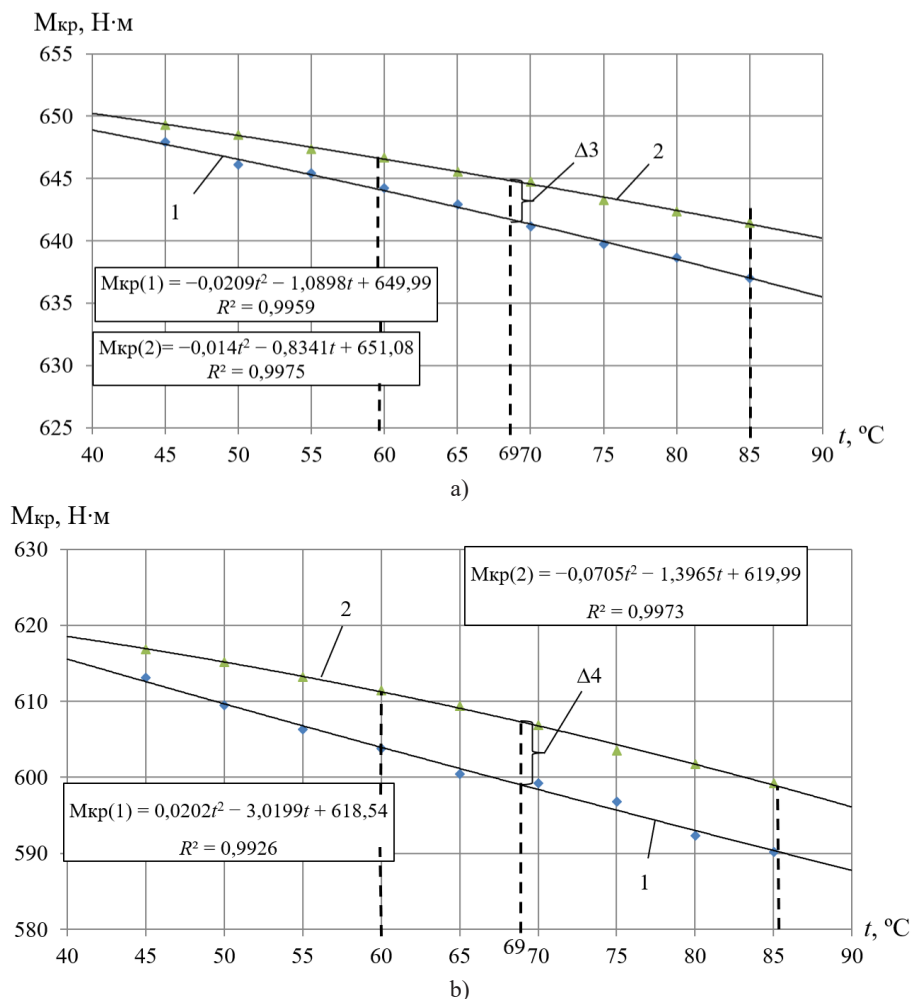
Зависимость объемного КПД и крутящего момента нового и имеющего наработку гидроагрегатов ГСТ-90 от температуры с исследуемыми марками гидравлических масел
The dependence of the volumetric efficiency and torque of the new and having operating time hydraulic units GST-90 on the temperature with the studied brands of hydraulic oils

Температура, °С / Temperature, °С	Новый объемный гидропривод ГСТ-90 / New volumetric hydraulic drive GST-90				Бывший в эксплуатации объемный гидропривод ГСТ-90 / Used volumetric hydraulic drive GST-90			
	Объемный КПД / Volumetric efficiency		Крутящий момент / Torque		Объемный КПД / Volumetric efficiency		Крутящий момент / Torque	
	Марки гидравлических масел / Brands of hydraulic oils				Марки гидравлических масел / Brands of hydraulic oils			
	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>	МГЕ-46В / MGE-46B	<i>SHELL TELLUS S2</i>
40	0,955	0,958	325,50	325,67	0,726	0,730	319,03	318,88
45	0,955	0,957	325,43	325,65	0,723	0,728	316,85	317,41
50	0,954	0,956	323,84	325,01	0,710	0,724	313,69	316,17
55	0,953	0,955	322,25	324,05	0,697	0,712	310,32	314,24
60	0,945	0,954	320,66	323,90	0,665	0,702	308,74	312,32
65	0,936	0,952	319,07	322,46	0,636	0,684	306,75	310,29
70	0,927	0,945	317,48	320,98	0,593	0,656	304,07	308,95
75	0,907	0,934	315,83	319,49	0,547	0,628	301,83	306,43
80	0,891	0,925	314,31	318,01	0,525	0,604	298,96	304,67
85	0,870	0,901	312,73	316,53	0,486	0,586	296,62	302,11



Р и с. 2. Результаты определения объемного КПД нового (а) и имеющего наработку (б) гидронасоса объемного гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90 с исследуемыми марками гидравлических масел в зависимости от температуры: 1 – кривая определения объемного КПД для нового и имеющего наработку гидронасоса с РЖ МГЕ-46В; 2 – кривая определения объемного КПД для нового и имеющего наработку гидронасоса с РЖ *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_1 и Δ_2 – величины погрешностей определенной объемного КПД при температуре +69 °С для нового и имеющего наработку гидронасоса между исследуемыми марками гидравлических масел

Fig. 2. The results of determining the volumetric efficiency of the new a) and operating time b) hydraulic pump of the *Danfoss Power Solutions* 90-series volumetric hydraulic drive with the brands of hydraulic oils under study, depending on temperature: 1 – curve of determining the volumetric efficiency for the new and having operating time hydraulic pump with WF MGE-46V; 2 – curve of determining the volumetric efficiency for the new and having operating time hydraulic pump with *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_1 and Δ_2 – values of errors in determining the volumetric efficiency at a temperature of +69°C for a new and having operating hydraulic pump between the brands of hydraulic oils under study



Р и с. 3. Результаты определения крутящего момента нового (а) и имеющего наработку (б) гидромотора объемного гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90 с исследуемыми марками гидравлических масел в зависимости от температуры: 1 – кривая определения крутящего момента нового и имеющего наработку гидромотора с РЖ МГЕ-46В; 2 – кривая определения крутящего момента нового и имеющего наработку гидромотора с РЖ *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_3 и Δ_4 – величины погрешностей определенная крутящего момента при температуре $+69^\circ\text{C}$ для нового и имеющего наработку гидромотора между исследуемыми марками гидравлических масел

F i g. 3. The results of determining the torque of a new a) and having operating time b) hydraulic motor volume hydraulic drive *Danfoss Power Solutions* 90-series with the brands of hydraulic oils under study, depending on temperature: 1 – curve of determining the torque of a new and operating time hydraulic motor with WF MGE-46V; 2 – curve of determining the torque of a new and having operating time hydraulic motor with WF *SHELL TELLUS S2 V46*; Δ_3 and Δ_4 – values of the errors of the torque measurement at a temperature of $+69^\circ\text{C}$ for a new and having operating hydraulic motor between the brands of hydraulic oils under study

Из рисунка 2 следует вывод, что в рабочем диапазоне температур $+60...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ объемный КПД новых гидронасосов *Danfoss Power Solutions* серии 90 при стендовых испытаниях с РЖ зарубежного производителя *SHELL TELLUS S2 V46* составляет $0,96...0,95$ (снижение на $1,05\%$), что не противоречит нормам завода-изготовителя [5], для РЖ российского производителя МГЕ-46В – $0,95...0,93$ (снижение на $2,2\%$).

Испытания имеющих наработку гидронасосов *Danfoss Power Solutions* серии 90 показали, что для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* объемный КПД составляет $0,82...0,80$ (снижение на $2,5\%$), для РЖ МГЕ-46В – $0,81...0,76$ (снижение $6,6\%$).

Для РЖ МГЕ-46В предельная (максимальная) температура, равная $+69\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствует паспортному значению объемного КПД – $0,95$ гидронасоса *Danfoss Power Solutions* серии 90.

Наибольшая погрешность определения объемного КПД для новых и бывших в эксплуатации гидронасосов *Danfoss Power Solutions* серии 90 между исследуемыми марками гидравлических масел составляет $\Delta_1 = 0,5\%$ и $\Delta_2 = 1,4\%$ при температуре $+69\text{ }^{\circ}\text{C}$. С увеличением температуры до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ погрешность определения объемного КПД для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* и МГЕ-46В увеличивается и составляет $2,4\%$ и $5,0\%$ соответственно.

Из рисунка 3 следует, что в рабочем диапазоне температур $+60...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ крутящий момент новых гидромоторов *Danfoss Power Solutions* серии 90 в при стендовых испытаниях с РЖ зарубежного производителя *SHELL TELLUS S2 V46* составляет $647...642\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $0,78\%$), для РЖ российского производителя МГЕ-46В – $645...637\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $1,3\%$).

Испытания имеющих наработку гидромоторов *Danfoss Power*

Solutions серии 90 показали, что для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* крутящий момент гидромотора составляет $612...599\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $2,1\%$), для РЖ МГЕ-46В – $604...590\text{ Н}\cdot\text{м}$ (снижение на $2,4\%$).

Наибольшая погрешность определения крутящего момента для новых и бывших в эксплуатации гидромоторов *Danfoss Power Solutions* серии 90 между исследуемыми марками гидравлических масел составляет $\Delta_3 = 0,4\%$ и $\Delta_4 = 1,3\%$ при температуре $+69\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С увеличением температуры до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ погрешность определения крутящего момента для РЖ *SHELL TELLUS S2 V46* и МГЕ-46В увеличивается и составляет $0,8\%$ и $1,5\%$ соответственно. Согласно данным исследованиям, гидравлическое масло марки МГЕ-46В в рабочем температурном диапазоне $+60...+69\text{ }^{\circ}\text{C}$ является годным для определения объемного КПД и крутящего момента гидропривода *Danfoss Power Solutions* серии 90.

Обсуждение и заключение

Полученные в статье результаты показали, что разномарочные гидравлические масла, в настоящее время используемые в качестве РЖ, оказывают влияние на достоверность определения параметров диагностирования различных объемных гидроприводов российского и зарубежного производства.

Установлено, что РЖ МГЕ-46В в оптимальных температурных диапазонах $+60...+69\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет обеспечить полноту диагностирования новых и имеющих наработку российских и зарубежных гидроагрегатов с высокой точностью в соответствии с требованиями ГОСТ 17108 и заводов-изготовителей. Поэтому данное гидравлическое масло можно, применять как универсальную РЖ для контроля технического состояния разномарочных гидроагрегатов на ремонтных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности использования метода тепловой диагностики гидростатической трансмиссии лесозаготовительных машин / А. В. Латынин [и др.] // Воронежский научно-технический Вестник. 2021. Т. 2, № 2 (36). С. 42–49. URL: <https://naukaru.ru/ru/storage/viewWindow/83009> (дата обращения: 11.06.2023).
2. Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 529–545. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>
3. Пугин К. Г., Шаякбаров И. Э. Повышение надежности гидравлических систем строительных и дорожных машин, эксплуатируемых в зимний период времени в арктической зоне РФ // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2022. № 1. С. 154–162. EDN: QTJVZV
4. Моделирование связи крутящего момента объемного гидропривода с параметрами гидравлического нагружающего устройства / С. В. Пьянзов [и др.] // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 72–82. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-dlya-otsenki-tehnicheskogo-sostoyaniya-obemnogo-gidroprivoda/viewer> (дата обращения: 11.06.2023).
5. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump / S. Lijian [et al.] // Renewable Energy. 2020. Vol. 153. P. 1455–1464. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>
6. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines / A. I. Pavlov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. Article no. 042086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>
7. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation / M. N. Kostomakhin [et al.] // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, Issue 4. P. 360–364. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22040189>
8. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов / П. В. Чумаков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 426–447. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
9. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks / E. V. Pestryakov [et al.] // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2022. Vol. 121. P. 92–101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9
10. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction // Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. Vol. 99. P. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>
11. New Method for Monitoring the Residual Life of High Pressure Hoses / A. I. Pavlov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042082>
12. Результаты стендовых испытаний гидрораспределителей, восстановленных с применением нанокomпозиционного гальванического железнения / В. В. Сафонов [и др.] // Научная жизнь. 2019. № 2. С. 43–50. <https://doi.org/10.26088/INOB.2019.90.30271>
13. Effect of Temperature Change on Hydraulic Oil Luminescence / B. Duan [et al.] // Journal of Harbin Engineering University. 2020. Vol. 41, Issue 12. P. 1785–1789. <https://doi.org/10.11990/jheu.201904082>
14. Investigation of the Influence of Hydraulic Oil Temperature on the Variable-Speed Pump Performance / Ł. Stawiński [et al.] // Eksploatacja i Niezawodność. 2022. Vol. 24, Issue 2. P. 289–296. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.2.10>
15. Temporary and Permanent Viscosity Loss Correlated to Hydraulic System Performance / P. W. Michael [et al.] // Tribology Transactions. 2018. Vol. 61, Issue 5. P. 901–910. <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1439210>
16. Thermo-hydraulic Performance of a Lubricant Containing Zinc Oxide Nano-particles: A Two-phase Oil / Z. Li [и др.] // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2020. Vol. 142, Issue 11. P. 107–112. <https://doi.org/10.1115/1.4047256>

17. Direct Driven Hydraulic Drive: Effect of Oil on Efficiency in Sub-Zero Conditions / Т. Minav [et al.] // *Energies*. 2019. Vol. 12, Issue 2. P. 219. <https://doi.org/10.3390/en12020219>
18. Study Effect of Antiturbulence Additives on Hydraulic Efficiency in Oil Pipelines by Disk Turborheometer / А. М. Nechval [et al.] // *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2021. Vol. 12, Issue 4. P. 0402161-1–0402161-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000610)
19. High-Speed Imaging of Water Hammer Cavitation in Oil-Hydraulic Pipe Flow / М. Jansson [et al.] // *Fluids*. 2022. Vol. 7, Issue 3. <https://doi.org/10.3390/fluids7030102>
20. Исследования по подбору отечественной вязкостной присадки для всепогодных гидравлических масел уровня HVLP / Л. А. Радченко [и др.] // *Мир нефтепродуктов*. 2020. № 5. С. 45–49. <https://doi.org/10.32758/2071-5951-2020-0-5-45-49>
21. Ding H., Liu Y., Zhao Ya. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load-Sensing Synchronous Control // *Measurement and Control*. 2020. Vol. 53, Issue 1–2. P. 119–125. <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
22. Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids / Z. Tkac [et al.] // *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40, Issue 1. P. 149–155. <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.01.14>
23. Разработка программного обеспечения стенда для контроля технического состояния объемных гидроприводов / С. В. Пьянзов [и др.] // *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31, № 4. С. 500–517. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>
24. Влияние температуры рабочей жидкости на объемный коэффициент полезного действия аксиально-поршневого гидронасоса / С. В. Пьянзов [и др.] // *Пермский аграрный вестник*. 2018. № 4 (24). С. 9–16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-temperatury-rabochey-zhidkosti-na-obemnyy-koeffitsient-poleznogo-deystviya-aksialno-porshnevo-go-gidronasosa/viewer> (дата обращения: 11.06.2023).

Поступила 13.06.2023; одобрена после рецензирования 27.07.2023; принята к публикации 10.08.2023.

Об авторах:

Ионов Павел Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой 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/0000-0001-9794-0071>, Researcher ID: S-7146-2018, resurs-ime@yandex.ru

Сенин Петр Васильевич, доктор технических наук, профессор, первый проректор Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, senin53@mail.ru

Земсков Александр Михайлович, 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/0000-0002-1489-6077>, Researcher ID: S-7748-2018, zam503@mail.ru

Пьянзов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель 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/0000-0002-5845-1635>, Researcher ID: B-1548-2019, serega.pyanzov@yandex.ru

Салмин Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортных машин Пензенского государственного университета (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7185-6733>, Researcher ID: Q-9667-2017, salmin-penza@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

П. А. Ионов – формирование структуры статьи, доработка начального варианта текста статьи, проведение и описание экспериментальных исследований, составление выводов и заключения.

П. В. Сенин – научное руководство, анализ и доработка текста статьи.

А. М. Земсков – анализ литературных данных, подготовка текста статьи с последующей доработкой, проведение и описание экспериментальных исследований, оптимизация регрессионных моделей, обработка полученных результатов исследования статьи.

С. В. Пьянзов – проведение экспериментальных исследований.

В. В. Салмин – анализ литературных данных и доработка текста статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Latynin A.V., Shvyriov A.N., Kondratenko I.Yu., Andreisheva I.S. Features of Thermal Diagnosis Method For Hydrostatic Transmission of Forest Machines. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2021;2(2):42–49. Available at: <https://naukaru.ru/ru/storage/viewWindow/83009> (accessed 11.06.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Ionov P.A., Senin P.V., Pyanzov S.V., Stolyarov A.V., Zemskov A.M. Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(4):529–545. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>

3. Pugin K.G., Shayakbarov I.E. Improving the Reliability of Hydraulic Systems of Construction and Road Vehicles Operated in Winter in the Arctic Zone of the Russian Federation. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences*. 2022;(1):154–162. (In Russ.) EDN: QTJVZV

4. Pyanzov S.V., Ionov P.A., Velichko S.A., Zemskov A.M. Modeling of the Coupling of the Torque of a Volumetric Hydraulic Drive with the Parameters of a Hydraulic Loading Device. *Technical Service of Machines*. 2021;(1):72–82. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-dlya-otsenki-technicheskogo-sostoyaniya-obemnogo-gidroprivoda/viewer> (accessed 11.06.2023). (In Russ.)

5. Lijian S., Wenpeng Z., Haifeng J., Fangping T., Li W., Dandan S., et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump. *Renewable Energy*. 2020;153:1455–1464. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>

6. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., Polyaniin I.A., Abibekov S.A., Lysyannikov A.V., et al. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:042086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>

7. Kostomakhin M.N., Kataev Y.V., Petrishchev N.A., Sayapin A.S., Molibozhenko K.K. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation. *Russian Engineering Research*. 2022;42(4):360–364. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22040189>

8. Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., Petrishehev N.A. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractor Mounted Hydraulic Systems. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):426–447. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>

9. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022;121:92–101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9

10. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019;99:34–40. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>

11. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., Sayapin A.S., Molibozhenko K.K., et al. New Method for Monitoring the Residual Life of High Pressure Hoses. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042082>
12. Safonov V.V., Shishurin S.A., Gorbushin P.A., Paramonov S.V., Khaikin A.A. Results of Bench Tests of Hydraulic Valves Restored Using Nanocomposition Galvanic Iron Plating. *Scientific Life*. 2019;(2):43–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26088/INOB.2019.90.30271>
13. Duan B., Jiang J., Zhang J., Hu Z., Che M. Effect of Temperature Change on Hydraulic Oil Luminescence. *Journal of Harbin Engineering University*. 2020;41(12):1785–1789. <https://doi.org/10.11990/jheu.201904082>
14. Stawiński L., Kosucki A., Cebulak M., Gorski A.G., Grala M. Investigation of the Influence of Hydraulic Oil Temperature on the Variable-Speed Pump Performance. *Eksploracja i Niezawodność*. 2022;24(2):289–296. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.2.10>
15. Michael P., Cheekolu M., Panwar P., Devlin M., Davidson R., Johnson D., et al. Temporary and Permanent Viscosity Loss Correlated to Hydraulic System Performance. *Tribology Transactions*. 2018;61(5):901–910. <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1439210>
16. Li Z., D’Orazio A., Karimpour A., Bach Q.V. Thermo-Hydraulic Performance of a Lubricant Containing Zinc Oxide Nano-Particles: A Two-Phase Oil. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2020;142(11):107–112. <https://doi.org/10.1115/1.4047256>
17. Minav T., Heikkinen J., Schimmel T., Dietola M. Direct Driven Hydraulic Drive: Effect of Oil on Efficiency in Sub-Zero Conditions. *Energies*. 2019;12(2):219. <https://doi.org/10.3390/en12020219>
18. Nechval A.M., Muratova V.I., Valeev A.R., Yang Ch., Tashbulatov R.R. Study Effect of Antiturbulence Additives on Hydraulic Efficiency in Oil Pipelines by Disk Turborheometer. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2021;12(4):0402161-1–0402161-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000610)
19. Jansson M., Andersson M., Karlsson M. High-Speed Imaging of Water Hammer Cavitation in Oil-Hydraulic Pipe Flow. *Fluids*. 2022;7(3). <https://doi.org/10.3390/fluids7030102>
20. Radchenko L.A., Morshanskaya Yu.A., Beskova A.V., Zhumlyakova M.A., Tyschenko V.A. Studies on the Selection of Domestic Viscosity Additives for Multi-Grade Hydraulic Oils HVLP. *The World of Petroleum Products*. 2020;(5):45–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.32758/2071-5951-2020-0-5-45-49>
21. Ding H., Liu Y., Zhao Y. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load Sensing Synchronous Control. *Measurement and Control*. 2020;53(1–2):119–125. <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
22. Tkáč Z., Kosiba J., Hujo L., Jablonický J., Nosian J. Experimental Hydraulic Device for the Testing of Hydraulic Pumps and Liquids. *Tribology in Industry*. 2018;40(1):149–155. <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.01.14>
23. Pyanzov S.V., Senin P.V., Ionov P.A., Jabloniky J., Nosian J. Developing the Test Bench Software for the Technical Inspection of Volumetric Hydraulic Drives. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):500–517. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>
24. Pyanzov S.V., Stolyarov A.V., Ionov P.A., Zemskov A.M. The Effect of the Temperature of the Working Fluid on the Volumetric Efficiency of the Axial Piston Hydraulic Pump. *Perm Agrarian Bulletin*. 2018;(4):9–16. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-temperatury-rabochey-zhidkostina-obemnyy-koeffitsient-poleznogo-deystviya-aksialno-porshnevoogo-gidronasosa/viewer> (accessed 11.06.2023). (In Russ.)

Submitted 13.06.2023; revised 27.07.2023; accepted 10.08.2023.

About the authors:

Pavel A. Ionov, Cand.Sci. (Engr.), Head of the Chair of Technical Service of Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, Researcher ID: S-7146-2018, resurs-ime@yandex.ru

Petr V. Senin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, First Vice-Rector of National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, senin53@mail.ru

Aleksandr M. Zemskov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Technical Service of Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, Researcher ID: S-7748-2018, zam503@mail.ru

Sergey V. Pyanzov, Cand.Sci. (Engr.), Senior Lecturer of the Chair of Technical Service of Machines, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, Researcher ID: B-1548-2019, serega.pyanzov@yandex.ru

Vladimir V. Salmin, Cand.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Transportation Machines, Penza State University (40 Krasnaya St., Penza 440026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7185-6733>, Researcher ID: Q-9667-2017, salmin-penza@yandex.ru

Authors contribution:

P. A. Ionov – developing the structure of the article, finalizing the initial text, conducting and describing experimental studies, and drawing a conclusion.

P. V. Senin – scientific guidance, analysis and revision of the text.

A. M. Zemskov – literature data analysis, text preparation with further revision, conducting and description of experimental studies, optimization of regression models, processing the obtained research results.

S. V. Pyanzov – experimental research.

V. V. Salmin – literature analysis and text revision.

All authors have read and approved the final manuscript.



Оценка эффективности влияния трубчатого турбулентного аппарата на кинетику процессов получения полимеров

Э. Н. Мифтахов¹✉, С. И. Мустафина¹, Н. Д. Морозкин¹,
И. Ш. Насыров², С. А. Мустафина¹

¹ Уфимский университет науки и технологий
(г. Уфа, Российская Федерация)

² Акционерное общество «Синтез-Каучук»
(г. Стерлитамак, Российская Федерация)

✉ promif@mail.ru

Аннотация

Введение. В условиях высокого спроса на полимерную продукцию ведется постоянная модернизация технологических процессов ее производства, огромная доля которого основана на применении микрогетерогенных каталитических систем. Физико-химические свойства полимерной продукции можно улучшить с помощью целенаправленного гидродинамического воздействия в турбулентных потоках. Исследование возникающих физико-химических закономерностей процессов синтеза полимерной продукции в присутствии модифицированных каталитических систем вызывает большой интерес.

Цель статьи. Оценка эффективности гидродинамического воздействия в турбулентных потоках на характер неоднородности катализатора и кинетику процессов получения полимеров.

Материалы и методы. При исследовании процессов синтеза полимеров использован имитационный подход к модельному описанию системы, основанный на идее воспроизведения различных сценариев непрерывного производства и проведении необходимой эмпирической оценки. Для повышения скорости расчетов при имитационном моделировании используются технологии параллельного программирования и облачных вычислений.

Результаты исследования. Разработана методология решения обратных задач, которая позволяет на основе известной физико-химической информации определять влияние внешних факторов на кинетическую активность и неоднородность активных центров. Использование имитационного моделирования с применением технологии облачных вычислений позволяет однозначно идентифицировать характер кинетической неоднородности в условиях усреднения реакционной способности активных центров.

Обсуждение и заключение. Апробация нового имитационного подхода к решению обратной задачи позволила оценить эффективность влияния трубчатого турбулентного аппарата на кинетику процесса получения полиизопрена в присутствии титанового катализатора и идентифицировать наличие двух активных центров: тип $A_{Ti} - \ln M = 13,4$, тип $B_{Ti} - \ln M = 11,7$, при этом доля активных центров типа A_{Ti} составляет 0,91; типа $B_{Ti} - 0,09$. На основе полученных данных становится возможным проводить постановку и решение обратных задач идентификации кинетических параметров с целью дальнейшего модельного описания системы.

© Мифтахов Э. Н., Мустафина С. И., Морозкин Н. Д., Насыров И. Ш., Мустафина С. А., 2023



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

Ключевые слова: синтетический каучук, полимер, трубчатый турбулентный аппарат, гидродинамическое воздействие, математическое моделирование

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FZWU-2023-0002).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка эффективности влияния трубчатого турбулентного аппарата на кинетику процессов получения полимеров / Э. Н. Мифтахов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 388–402. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.388-402>

Original article

Evaluating the Efficiency of the Tube Turbulent Apparatus Influence on Kinetics of Polymer Production Processes

E. N. Miftakhov^a✉, S. I. Mustafina^a, N. D. Morozkin^a,
I. Sh. Nasyrov^b, S. A. Mustafina^a

^a Ufa University of Science and Technology (Ufa, Russian Federation)

^b Join Stock Company Sintez Rubber

(Sterlitamak, Russian Federation)

✉ promif@mail.ru

Abstract

Introduction. Because of high demand for polymer products, there are constantly modernized the technological aspects of their production, a huge share of which is based on the use of microheterogeneous catalytic systems. Physicochemical properties of polymer products can be improved through targeted hydrodynamic effect in turbulent flows. The study of physicochemical patterns of polymer product synthesis in the presence of modified catalytic systems is of great interest.

Aim of the Article. The article is aimed at evaluating the efficiency of hydrodynamic influence in turbulent flows on the type of catalyst heterogeneity and the kinetics of polymer production processes.

Materials and Methods. In the study of polymer synthesis processes, there is used a simulation approach to the system model description that is based on the idea of reproducing various scenarios of uninterrupted production and conducting the necessary empirical analysis. Parallel programming and cloud computing technologies are used in simulation modeling to increase computational speed.

Results. A methodology for solving inverse problems has been developed to determine the influence of external factors on the kinetic activity and heterogeneity of active centers on the basis of known physicochemical information. The use of simulation modeling with the application of cloud computing technology makes it possible to unambiguously determine the type of kinetic heterogeneity in the conditions of averaging the reactive capacity of active centers.

Discussion and Conclusion. Approbation of the new simulation approach to the solution of the inverse problem allowed evaluating the efficiency of the influence of the tube turbulent apparatus on the kinetics of producing polyisoprene in the presence of titanium catalyst and identifying the presence of two active centers: type A_{Ti} – $\ln M = 13.4$, type B_{Ti} – $\ln M = 11.7$, while the proportion of active centers type A_{Ti} is 0.91; type B_{Ti} – 0.09. Based on the data obtained, it becomes possible to formulate and solve inverse problems of identifying kinetic parameters for further model description of the system.

Keywords: synthetic rubber, polymer, tube turbulent apparatus, hydrodynamic action, mathematical modeling

Acknowledgments: This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific code FZWU-2023-0002).

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

For citation: Miftakhov E.N., Mustafina S.I., Morozkin N.D., Nasyrov I.Sh., Mustafina S.A. Evaluating the Efficiency of the Tube Turbulent Apparatus Influence on Kinetics of Polymer Production Processes. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):388–402. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.388-402>

Введение

В условиях модернизации существующих циклов непрерывного производства ведутся активные исследования, позволяющие изменить активность применяемых катализаторов и оказать значимое влияние на свойства получаемой продукции. Ключевой особенностью микрогетерогенных каталитических систем является получение продукта с достаточно высоким значением полидисперсности, что является следствием наличия в системе различных типов активных центров, способных проявлять различную реакционную способность и стереоспецифичность [1]. С целью воздействия на кинетическую неоднородность применяются различные подходы, к которым можно отнести как изменение химического состава катализатора [2], так и изменение гидродинамического режима [3] в зоне реакции.

Проведенные экспериментальные исследования [4; 5] демонстрируют огромный эффект, который возникает после гидродинамического воздействия с использованием трубчатого турбулентного аппарата на состав, активность катализатора и, как следствие, на кинетику процессов получения полимеров.

В условиях действующего промышленного производства оценить

эффективность гидродинамического воздействия на физико-химические свойства конечного продукта практически невозможно, что определяет актуальность модельного подхода к математическому описанию процесса, позволяющего воспроизвести необходимые сценарии ведения производства.

Целью данной работы является создание необходимых цифровых инструментов, позволяющих оценить эффективность использования трубчатого турбулентного аппарата на кинетику процессов получения полимерной продукции.

Обзор литературы

Вследствие микрогетерогенности используемых катализаторов изменение их дисперсного состава способно оказывать значимое влияние на свойства производимого полимерного продукта. В работе С. А. Будера¹ впервые было показано, что при увеличении интенсивности перемешиваний реакционной смеси для процесса стереоспецифической полимеризации изопрена наряду с ростом скорости процесса наблюдается заметное снижение расхода катализатора.

Впервые конструкция такого трубчатого турбулентного аппарата (ТТА) была предложена А. А. Берлином². Проводимые дальнейшие исследования [6]³ определяли возникающий

¹ Влияние вязкости раствора и скорости перемешивания на скорость полимеризации изопрена в присутствии катализатора Циглера / С. А. Будер [и др.] // Промышленность СК. 1983. № 7. С. 9–11.

² Трубчатые турбулентные реакторы – основа энерго- и ресурсосберегающих технологий / А. А. Берлин [и др.] // Хим. Промышленность. 1995. № 9. С. 550–559; Физико-химические основы протекания быстрых жидкофазных процессов / В. П. Захаров [и др.]. М. : Наука. 2008. 348 с.

³ Нетрадиционный способ повышения стереорегулярности и улучшения некоторых других характеристик цис-1,4-изопренового каучука / К. С. Минскер [и др.] // Журнал прикладной химии. 1999. Т. 72, № 6. С. 996–1001; Нетрадиционный способ воздействия на молекулярные характеристики полиолефинов и полидиенов / К. С. Минскер [и др.] // Доклады Академии наук. 2001. Т. 381, № 3. С. 373–376.

эффект при интенсивном перемешивании. В своих научных обоснованиях исследователи руководствовались идеей разделения всех характерных для сложного процесса реакций на быстрые и медленные стадии, протекающие в различных потоках. Для формирования и последующего инициирования активных центров свойственна достаточно высокая скорость, что является причиной возникающих диффузионных ограничений и предопределяет неоднородность распределения образующихся активных центров [7–10]. Изменение гидродинамического режима с использованием ТТА позволяет отделить быстрые стадии и обеспечить практически идеальные условия протекания процесса.

В ранее проведенных исследованиях достаточно подробно изучались вопросы влияния турбулентного перемешивания на размеры частиц каталитической системы [11], а также на кинетические параметры, характеризующие скорости отдельных элементарных реакций [12].

Для оценки гидродинамического влияния исследователи руководствуются изменением числа активных центров, иницирующих процесс полимеризации. Изучение характера кинетической неоднородности катализатора проводится путем постановки и решения обратной задачи на основании первичной физико-химической информации в виде кривой молекулярно-массового распределения (ММР).

Классический подход, позволяющий оценить эффективность гидродинамического воздействия в турбулентных потоках на кинетическую неоднородность катализатора, предполагает решение задачи идентификации функции распределения активных центров $\varphi(\lambda)$ исходя из выражения:

$$q_{\text{эксп}}(M) = \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) K(\lambda, M) d\lambda, \quad (1)$$

где λ – статистический параметра Френкеля; $K(\lambda, M)$ – ядро интегрального уравнения, отражающее механизм полимеризационного процесса; $q_{\text{эксп}}(M)$ – вектор, определяющий ММР продукта. В качестве ядра интегрального уравнения для микрогетерогенных каталитических систем чаще всего используется распределение Флори [13]

$$K(\lambda, M) = \lambda^2 M e^{-\lambda M}. \quad (2)$$

Задача вида (1) является некорректно поставленной и успешно решается с помощью метода регуляризации, предложенного академиком А. Н. Тихоновым⁴. Ранее данный подход успешно применялся для восстановления характера кинетической неоднородности каталитической системы на основе сольвата хлорида гадолиния [14; 15]. В частности, в работе В. П. Захарова и соавторов было описано исследование кинетической неоднородности титансодержащей и неодимсодержащей каталитических систем в условиях предварительного гидродинамического воздействия в турбулентных потоках, продемонстрировавшее снижение кинетической неоднородности [16]. Л. А. Бигаевой [17] с соавторами была решена обратная задача формирования молекулярно-массового распределения ионно-координационной полимеризации образца полиизопрена, синтезированного на каталитической системе TiCl_4 –пиперилен– $\text{Al}(\text{i-C}_4\text{H}_9)_3$. В свою очередь А. С. Зиганшина [18] проводила исследование активности частиц каталитической системы TiCl_4 – $\text{Al}(\text{i-C}_4\text{H}_9)_3$ путем изменения дисперсионного состава в процессе получения полибутадиена.

Во всех указанных случаях решения обратной задачи формирования молекулярно-массового распределения большое внимание уделяется параметру, характеризующему погрешность

⁴ Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1986. 288 с.
Technologies, machinery and equipment

экспериментальных данных. Большая ошибка эксперимента приводит к «размыванию» хроматограмм, что отражается на получаемой кривой распределения активных центров и способствует неверной интерпретации результатов.

Материалы и методы

Программная реализация и вычислительные эксперименты, проведенные ранее, показали высокую чувствительность подхода к решению обратной задачи, основанного на методе регуляризации А. Н. Тихонова, к исходным экспериментальным данным. В работе [19] показано, что при погрешности лабораторных измерений более чем 10 % становится практически невозможно оценить доли активных центров, на которых образуются фракции полимеров с наиболее низкой молекулярной массой. Все это определяет необходимость учета влияния параметров погрешности на возможность корректного решения обратной задачи формирования молекулярно-массового распределения [20].

Кроме того, в ряде случаев часто возникали проблемы, связанные с высокой осцилляцией получающегося решения на концах, которые не позволяли качественно интерпретировать расчетные результаты. Часто успех решения обратной задачи зависел от корректности выбора параметра регуляризации α , единственным критерием для которого выступает минимизация функции невязки, определяющей абсолютную разность между экспериментальными и расчетными значениями распределения. При проведении вычислительных экспериментов нередко возникали ситуации, когда численные методы решения задачи в формуле (1) давали отличающиеся друг от друга результаты в виде совокупности параметров α и p_i , что определяло необходимость дополнительного анализа получающегося решения.

Проблемы возникают и в тех случаях, когда потенциальные активные центры

расположены достаточно близко друг к другу. В частности, в работе [21] для полиизопрена на TiCl_4 -ДФО-пипериллен- $\text{Al}(\text{i-C}_4\text{H}_9)_3$ авторы столкнулись с задачей разложения «размытых» максимумов, т. е. когда перекрытие отдельных функций существенно.

В условиях возникающих проблем была реализована альтернативная методика решения обратной задачи, позволяющая на основании единственного допущения о том, что распределение на каждом типе активных центров описывается одним из модельных распределений, в автоматическом режиме решить задачу подбора числа активных центров и долей каждого типа, а также кинетических параметров, способствующих образованию полимеров с заданной молекулярной массой на каждом активном центре.

Основная идея нового имитационного подхода заключается в том, что программным образом «разыгрываются» различные сценарии ведения процесса, определяемые числом активных центров – N , долей каждого активного центра в общем составе катализатора – p_i и кинетическими параметрами, которые определяют статистический параметр Френкеля – λ_i и приводят к формированию различных вариантов ММР. Воспроизводимое таким образом ММР, которое наилучшим образом описывает результаты эксперимента, в свою очередь определяет искомый набор параметров p_i и λ_i ($i = 1 \dots N$). Таким образом, если классический подход к анализу кинетической неоднородности предполагает решение обратной задачи, то в условиях реализации новой методики проводится многократное решение прямой задачи воспроизведения вида ММР как суперпозиции распределений, характерных для каждого типа активного центра, и выбирается тот набор параметров p_i и λ_i , которые определяют ММР, максимально приближенное к экспериментальному.

Однако при всей логичности и структурированности предлагаемого подхода при его реализации потребовалось решить ряд возникающих проблем. Во-первых, неизвестно каким образом идентифицировать точное число активных центров, инициирующих процесс полимеризации. Действительно, если исходное ММР может быть описано наличием лишь N типов активных центров, то оно также легко может быть описано с помощью $N+1$ активных центров. В связи с этим в рамках реализации данного подхода к решению обратной задачи необходимо руководствоваться критерием минимизации возможного количества активных центров. Следовательно, на начальном этапе закладывается лишь один тип активного центра и определяются возможные кинетические параметры, позволяющие приблизить ММР к экспериментальному. Если же разница между экспериментальным и расчетным ММР превышает допустимую погрешность, то число активных центров увеличивается до двух и определяются возможные кинетические параметры, соответствующие каждому типу. Алгоритм повторяется до тех пор, пока разница между экспериментальным и расчетным ММР не станет менее максимально допустимого размера ошибки.

Вторая проблема выражается в достаточно низкой скорости обработки огромного количества сценариев при проведении вычислительных экспериментов. Для того чтобы многократный перебор различных вариантов молекулярно-массового распределения стал осуществимым, алгоритм пошагового воспроизведения был оптимизирован: все расчетные зависимости выведены за пределы итерационного поиска, шаг сдвига функционально зависит от величины ошибки. Однако наибольшее влияние на скорость расчетов оказала интеграция технологий параллельного

программирования и технологий облачных вычислений [22–24], эффективность которых уже была ранее продемонстрирована при исследовании сложных физико-химических процессов [25–28].

Результаты исследования

Апробация имитационного подхода к оценке кинетической неоднородности осуществлялась на промышленном производстве. Согласно технологическим условиям, непрерывный процесс получения полиизопрена организован в каскаде реакторов идеального перемешивания (рис. 1) объемом до $16,6 \text{ м}^3$. Каждый реактор снабжен мешалкой, мощность электродвигателя которой составляет 30 кВт, что позволяет поддерживать постоянную скорость перемешивания ($20\div 40$ оборотов в минуту). Поскольку организация какого-либо подвода теплоносителя отсутствует, то регулирование температуры ведения процесса осуществляется только за счет температуры поступающей реакционной смеси. Раствор мономера, который поступает в основную линию промышленного производства, формируется в результате смешения изопрена и возвратного растворителя.

С целью воздействия на поверхностную структуру катализатора на стадии его приготовления установлен малогабаритный ТТА (рис. 2), оказывающий существенное влияние на характер кинетической неоднородности катализатора.

Непрерывный процесс получения полиизопрена в присутствии титанового катализатора предполагает использование всего двух реакторов каскада, а суспензию каталитического комплекса при этом получают при $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ путем сливания толуольных растворов TiCl_4 (катализатор) с $\text{Al}(i\text{-C}_4\text{H}_9)_3$ (сокатализатор), р-электронодонорной добавкой дифенилоксида (ДФО) и -электронодонорной добавкой пиперилена.

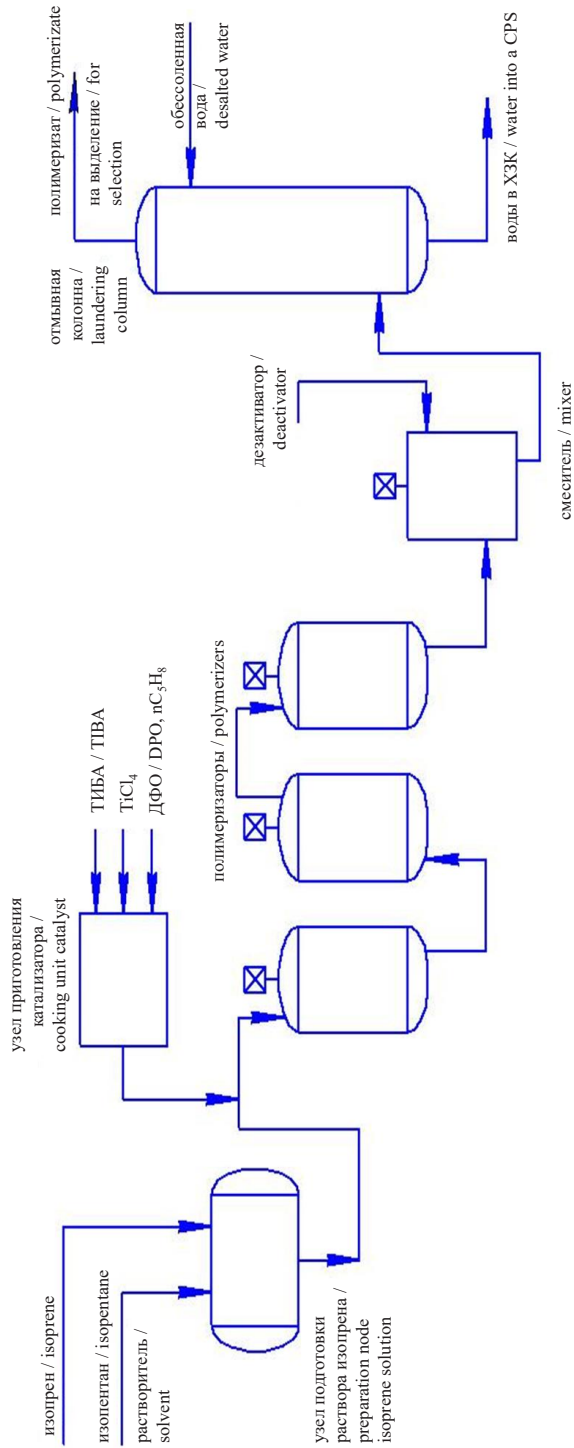
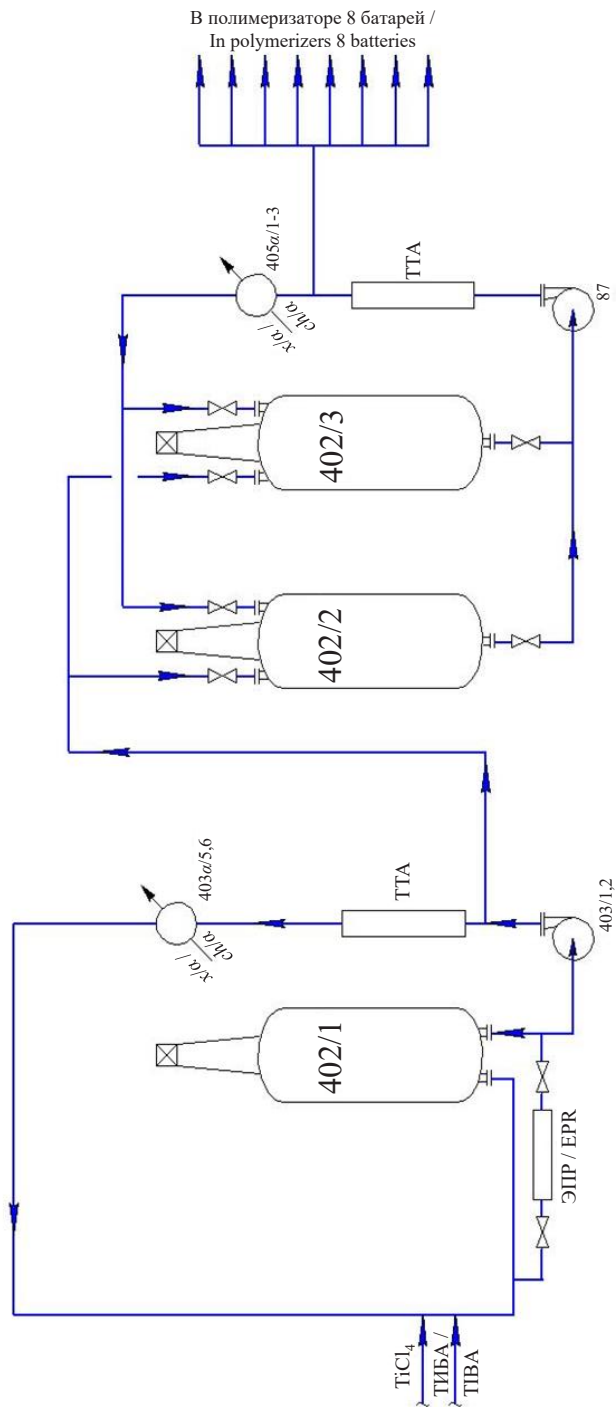


Рис. 1. Технологическая схема организации непрерывного производства полиизопрена
 Fig. 1. Technological scheme of organization of polyisoprene uninterrupted production



Р и с. 2. Технологическая схема приготовления катализатора с использованием турбулентного аппарата
F i g. 2. Technological scheme of preparing the catalyst using a turbulent apparatus

Состав катализатора формировали исходя из мольного соотношения $TiCl_4/ТИБА/ПП/ДФО = 1/1/0,2/0,15$ с дозировкой 1 моль $TiCl_4/980$ моль изопрена.

Полученный полиизопрен исследовался методом гель-проникающей хроматографии (ГПХ). Метод измерения основан на различии времен удерживания макромолекул полимера, растворенных в элюенте, в зависимости от их размеров в порах носителя разделяющей системы.

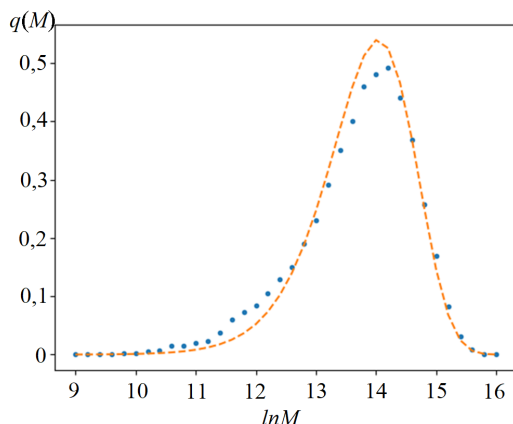
Апробация имитационного подхода проводилась последовательно. Согласно результатам эксперимента, индекс полидисперсности получаемого продукта составляет $M_w/M_n = 2,56$. Результаты проведенных расчетов для предполагаемых условий существования лишь одного типа активного центра представлены на рисунке 3. При этом было получено расчетное значение статистического параметра Френкеля $\lambda = 1,6 \cdot 10^{-6}$. Для количественной оценки согласованности расчетного молекулярно-массового распределения с экспериментальным рассчитывалась величина ошибки

$$\delta^2 = \sum_i (q_{\text{эксп}} [i] - q_{\text{расч}} [i])^2,$$

которая составила 0,02. Очевидно, что если закладывать в систему организации расчетов лишь один тип активного центра, то он не способен будет обеспечить необходимую ширину молекулярно-массового распределения, а исходное молекулярно-массовое распределение нельзя описать моноцентральной моделью.

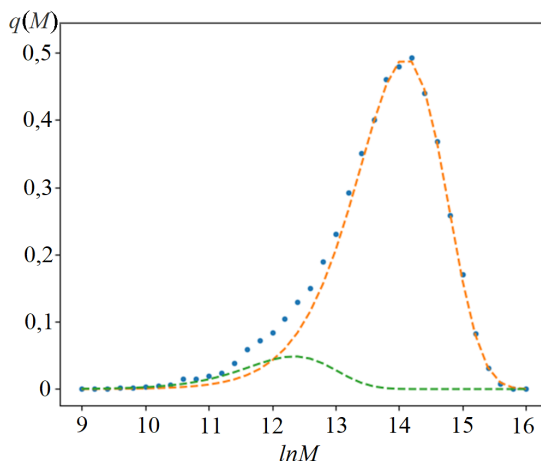
Продолжение работы алгоритма для случая использования двух типов активных центров позволило идентифицировать значения $p = (0,91; 0,09)$ для $\lambda = (1,5 \cdot 10^{-6}; 8,7 \cdot 10^{-6})$. Величина ошибки δ^2 при этом составила $7,3 \cdot 10^{-4}$ (рис. 4). Дополнительных шагов для реализации имитационного подхода к решению обратной задачи не требуется, поскольку расчетное молекулярно-массовое распределение, получаемое в результате суперпозиции распределений, характерных для каждого типа активного центра, достаточно хорошо согласуется с итогами эксперимента.

В результате проведенных вычислений имитационный подход к решению обратной задачи формирования ММР позволил идентифицировать наличие двух активных центров: тип $A_{Ti} - \ln M = 13,4$, тип $B_{Ti} - \ln M = 11,7$, при этом доля активных центров типа A_{Ti} составила 0,91; тип $B_{Ti} - 0,09$.



Р и с. 3. Результаты работы имитационного подхода к решению обратной задачи (точки – исходная кривая молекулярно-массового распределения; штрих – расчетная кривая)

F i g. 3. Results of the simulation approach to solving the inverse problem (dots are the initial curve of the molecular weight distribution; dashed line is the calculated curve)



Р и с. 4. Результаты работы имитационного подхода к решению обратной задачи (точки – исходная кривая молекулярно-массового распределения; штрих – расчетная кривая для активных центров 1 и 2 типа)

F i g. 4. Results of the simulation approach to solving the inverse problem (dots are the initial curve of the molecular weight distribution; dashed line is the calculated curve for active centers of types 1 and 2)

Обсуждение и заключение

Таким образом, разработана методология решения обратных задач, которая позволяет на основании известной физико-химической информации определять влияние внешних факторов на кинетическую активность и неоднородность активных центров. В частности, на основании исходной кривой молекулярно-массового распределения представленный имитационный подход позволил оценить эффективность гидродинамического воздействия в турбулентных потоках на исходный состав катализатора в непрерывном производстве 1,4-цис-полиизопрена. Поскольку гидродинамическое воздействие оказывает существенное влияние на характер кинетической неоднородности и способствует усреднению реакционной способности активных центров, то часто максимумы могут быть расположены

близко друг к другу и сложно поддаются однозначной идентификации. Использование имитационного подхода в этом случае становится оправданным.

Апробация нового имитационного подхода к решению обратной задачи позволила оценить эффективность влияния трубчатого турбулентного аппарата на кинетику процесса получения полиизопрена в присутствии титанового катализатора и идентифицировать наличие двух активных центров: тип A_{Ti} – $\ln M = 13,4$, тип B_{Ti} – $\ln M = 11,7$, при этом доля активных центров типа A_{Ti} составляет 0,91; типа B_{Ti} – 0,09.

На основании полученных данных становится возможным проводить постановку и решение обратных задач идентификации кинетических параметров с целью дальнейшего модельного описания системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Active Sites of Polymerization. Multiplicity: Stereospecific and Kinetic Heterogeneity / G. Zaikov [et al.]. London : CRC Press, 2005. 397 p.

2. Impact of Methylaluminoxane Oxidation on the Ethylene Polymerization Using Ni Catalysts / R. Tanaka [et al.] // *Organometallics*. 2022. Vol. 41, Issue 21. P. 3024–3031. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.2c00440>
3. Исследование кинетики процесса полимеризации изопрена в присутствии неодимсодержащих каталитических систем, модифицированных в турбулентных потоках / Э. Н. Мифтахов [и др.] // *Журнал прикладной химии*. 2021. Т. 94, № 1. С. 77–83. <https://doi.org/10.31857/S0044461821010114>
4. Assessing the Hydrodynamic Effect on the Molecular Parameters of the Isoprene Polymerization Product in the Presence of a Neodymium-Based Catalytic System / S. Mustafina [et al.] // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, Issue 21. P. 17652–17657. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00469>
5. Характеристики стереорегулярного цис-1,4-полиизопрена, полученного в условиях крупнотоннажного производства на титановых и лантаноидных катализаторах, модифицированных в турбулентных потоках / И. Ш. Насыров [и др.] // *Журнал прикладной химии*. 2021. Т. 94, № 6. С. 741–747. <https://doi.org/10.31857/S0044461821060074>
6. Интенсификация быстрых химических процессов на межфазных границах двухкомпонентных жидких сред в трубчатых турбулентных реакторах / А. А. Берлин [и др.] // *Химическая физика*. 2019. Т. 38, № 1. С. 19–26. <https://doi.org/10.1134/S0207401X19010059>
7. Roshchin D. E., Patlazhan S. A., Berlin A. A. Free-radical Polymerization in a Droplet with Initiation at the Interface // *European Polymer Journal*. 2023. Vol. 190. Article no. 112002. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112002>
8. Modified Free Volume Theory for Self-Diffusion of Small Molecules in Amorphous Polymers / A. Mansuri // *Macromolecules*. 2023. Vol. 56, Issue 8. P. 3224–3237. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c02451>
9. Multiscale Theoretical Tools for in Silico Macromolecular Chemistry and Engineering / M. Edleeva [et al.] // *In-Silico Approaches to Macromolecular Chemistry*. 2023. P. 17–69. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90995-2.00012-6>
10. Кинетика полимеризации изопрена в присутствии каталитической системы $\text{NdCl}_3 \cdot \text{NCH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3\text{-Al}(\text{i-C}_4\text{H}_9)_3$ -пиперилен / К. А. Терещенко [и др.] // *Химическая физика*. 2019. Т. 13. С. 170–176. <https://doi.org/10.1134/S0207401X19020134>
11. Гидродинамическое воздействие на каталитическую систему $\text{TiCl}_4\text{-Al}(\text{i-C}_4\text{H}_9)_3$ при полимеризации изопрена / К. С. Минскер [и др.] // *Вестник Башкирского университета*. 2003. Т. 8, № 3–4. С. 29–31.
12. Молекулярные характеристики цис-1,4-полиизопрена при формировании каталитической системы $\text{TiCl}_4\text{-Al}(\text{i-C}_4\text{H}_9)_3$ в турбулентном режиме / В. П. Захаров [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2004. Т. 46, № 10. С. 1765–1769.
13. Determination of Catalyst Active Sites Distributions in Ionic Polymerization / T. S. Usmanov [et al.] // *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2005. Vol. 13. P. 101–107. <https://doi.org/10.1080/10682760410001697822>
14. Мифтахов Э. Н., Мустафина С. А. Решение обратной задачи формирования молекулярно-массового распределения методом регуляризации А. Н. Тихонова : свидетельство о государственной регистрации программы. № 2021618232; заявл. 11.05.2021; опублик. 25.05.2021.
15. Исследование кинетической неоднородности каталитической системы на основе сольвата хлорида гадолиния в производстве 1,4-цис-полиизопрена / Э. Н. Мифтахов [и др.] // *Журнал прикладной химии*. 2022. Т. 95, № 3. С. 423–429. <https://doi.org/10.31857/S0044461822030100>
16. Кинетическая неоднородность титановых и неодимовых катализаторов производства 1,4-цис-полиизопрена / Захаров В. П. [и др.] // *Химическая физика*. 2015. Т. 9. С. 300–305. <https://doi.org/10.7868/S0207401X15030139>
17. Обратная задача молекулярно-массового распределения и анализ функций распределения / Л. А. Бигаева [и др.] // *Башкирский химический журнал*. 2014. Т. 21, № 2. С. 65–69.
18. Controlling the Activity of Particles of $\text{TiCl}_4\text{-Al}(\text{i-C}_4\text{H}_9)_3$ Catalytic System by Changing Their Dispersion Composition in the Process of Producing Low-Molar-Mass Polybutadiene – a Component of Sticky Glue / A. Ziganshina [et al.] // *Polymer Science, Series D*. 2020. Vol. 13. P. 365–371. <https://doi.org/10.1134/s199542122004022x>

19. Модифицированный метод решения обратных задач формирования молекулярно-массового распределения в условиях интервального характера исходных экспериментальных данных / Э. Н. Мифтахов [и др.] // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2022. Т. 1, № 47. С. 102–112. <https://doi.org/10.26456/vtchem2022.1.10>
20. Kinetic Heterogeneity of Polymer Products Obtained in the Presence of Microheterogenic Catalytic Systems Based on Gel Chromatograms / E. Miftakhov [et al.] // Periódico Tchê Química. 2021. V. 18, Issue 38. P. 27–37. https://doi.org/10.52571/PTQ.v18.n38.2021.03_MIFTAKHOV_pgs_27_37.pdf
21. О проблеме решения обратной некорректной задачи в химической технологии полимеров: интерпретация гель-хроматограмм / Л. А. Бигаева [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 3. С. 86–92.
22. Cloud Computing in Construction Industry: Use Cases, Benefits and Challenges / S. Bello [et al.] // Automation in Construction. 2020. Vol. 122. Article no. 103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>
23. Mustafa C., Zeebaree S. Sufficient Comparison among Cloud Computing Services: IaaS, PaaS, and SaaS: A Review. 2021. Vol. 5. P. 17–30. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.4481415>
24. A Survey of Biological Data in a Big Data Perspective / D. Gabriel [et al.] // Big Data. 2022. Vol. 10, Issue 4. P. 279–297. <https://doi.org/10.1089/big.2020.0383>
25. Developing Methods and Algorithms for Cloud Computing Management Systems in Industrial Polymer Synthesis Processes / E. Miftakhov [et al.] // Emerging Science Journal. 2021. Vol. 5, Issue 6. P. 964–972. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-01324>
26. SaaS is the Service for Solving Problems of Chemical Kinetics / A. Daminov [et al.] // 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649017>
27. Making it Rain: Cloud-based Molecular Simulations for Everyone / P. Arantes [et al.] // Journal of Chemical Information and Modeling. 2021. Vol. 61. P. 4852–4856. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2021-9f2m5>
28. GROMACS in the Cloud: A Global Supercomputer to Speed Up Alchemical Drug Design / K. Carsten [et al.] // Journal of Chemical Information and Modeling. 2022. Vol. 62, Issue 7. P. 1691–1711. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.2c00044>

Поступила 05.07.2023; одобрена после рецензирования 01.08.2023; принята к публикации 20.08.2023.

Об авторах:

Мифтахов Эльдар Наилевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-5949>, Researcher ID: AAA-5885-2019, Scopus ID: 56178153800, promif@mail.ru

Мустафина Софья Ильшатовна, младший научный сотрудник Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8036-3001>, Scopus ID: 57204930367, sofiamustafina@mail.ru

Морозкин Николай Данилович, доктор физико-математических наук, профессор, президент Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5051-7094>, Scopus ID: 6603118906, morozkinnd@mail.ru

Насыров Ильдус Шайхитдинович, кандидат химических наук, заместитель генерального директора по развитию (по науке) Акционерного общества «Синтез-Каучук» (453110, Российская Федерация, г. Стерлитамак, ул. Техническая, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8273-3651>, Scopus ID: 6603373003, nasurovish@mail.ru

Мустафина Светлана Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по развитию филиальной сети, заведующий кафедрой математического моделирования Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6363-1665>, Researcher ID: AAC-3926-2020, Scopus ID: 6603592002, mustafina_sa@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Э. Н. Мифтахов – разработка методов и алгоритмов решения прямых задач, проведение вычислительных экспериментов, подготовка текста статьи.

С. И. Мустафина – программирование вычислительных методов для организации расчетов.

Н. Д. Морозкин – анализ получаемых результатов исследования, обзор литературных источников.

И. Ш. Насыров – планирование и организация необходимых лабораторных экспериментов.

С. А. Мустафина – постановка цели и задачи исследования, планирование необходимых вычислительных экспериментов, анализ получаемых результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Zaikov G., Monakov Y., Sigaeva N., Urazbaev V. Active Sites of Polymerization. Multiplicity: Stereospecific and Kinetic Heterogeneity. London: CRC Press; 2005.
2. Tanaka R., Sogo K., Komaguchi K., Ae K., Nakayama Y., Shiono T. Impact of Methylaluminoxane Oxidation on the Ethylene Polymerization Using Ni Catalysts. *Organometallics*. 2022;41(21):3024–3031. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.2c00440>
3. Miftakhov E.N., Nasyrov I.S., Mustafina S.A., Zakharov V.P. Study of Kinetics of Isoprene Polymerization in the Presence of Neodymium-Containing Catalytic Systems Modified in Turbulent Flows. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021;94(1):77–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1070427221010110>
4. Mustafina S., Miftakhov E., Akimov A., Podvalny S., Gabelashvili K. Assessing the Hydrodynamic Effect on the Molecular Parameters of the Isoprene Polymerization Product in the Presence of a Neodymium-Based Catalytic System. *ACS Omega*. 2022;7(21):17652–17657. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00469>
5. Nasyrov I.Sh., Zhavoronkov D.A., Shurupov O.K., Zakharova E.M., Vasiliev V.A., Zakharov V.P. Characteristics of Stereoregular cis-1,4-Polyisoprene Obtained under the Conditions of a Large-Tonnage Production Process on Titanium and Lanthanide Catalysts Modified in Turbulent Flows. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021;94(6):741–747. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1070427221060070>
6. Berlin A.A., Patlazhan S.A., Kravchenko I.V., Prochukhan K.Yu., Prochukhan Yu.A. Intensification of Fast Chemical Processes at Interfaces of Two-Component Liquid Media in Tubular Turbulent Reactors. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2019;38(1):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0207401X19010059>
7. Roshchin D.E., Patlazhan S.A., Berlin A.A. Free-Radical Polymerization in a Droplet with Initiation at the Interface. *European Polymer Journal*. 2023;190:112002. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112002>
8. Mansuri A., Völkel M., Feuerbach T., Winck J., Vermeer A., Hoheisel W., Thommes M. Modified Free Volume Theory for Self-Diffusion of Small Molecules in Amorphous Polymers. *Macromolecules*. 2023;56(8):3224–3237. (In Russ.) <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c02451>
9. Edeleva M., Arraez F., Wu Y., Xie L., Figueira F., Marien Y. [et al.]. Multiscale Theoretical Tools for in Silico Macromolecular Chemistry and Engineering. In: In-Silico Approaches to Macromolecular Chemistry. 2023. p. 17–69. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90995-2.00012-6>
10. Tereshchenko K.A., Ulitin N.V., Shiyan D.A., Almetova G.F., Zakharova E.M., Nasyrov I.Sh., [et al.]. Kinetics of Isoprene Polymerization in the Presence of the Catalytic System NdCl₃ NCH₃CH(OH)CH₃-Al(i-C₄H₉)₃-Piperylene. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2019;13:170–176. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1990793119010299>

11. Minsker K.S., Zakharov V.P., Sadykov I.V., Ionova I.A., Berlin A.A., Monakov Yu.B. Hydrodynamic Effect on the $TiCl_4-Al(i-C_4H_9)_3$ Catalytic System During Isoprene Polymerization. *Bulletin of the Bashkir University*. 2003;8(3–4):29–31. (In Russ.)
12. Zakharov V.P., Sadykov I.V., Minsker K.S., Berlin A.A., Monakov Yu.B. Molecular Characteristics of cis-1,4-Polyisoprene during the Formation of the $TiCl_4-Al(i-C_4H_9)_3$ Catalytic System in the Turbulent Regime. *High Molecular Compounds. Series: B*. 2004;46(10):1765–1769. (In Russ.)
13. Usmanov T.S., Yagola A.G., Usmanov S.M., Monakov Y.B. Determination of Catalyst Active Sites Distributions in Ionic Polymerization. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2005;13:101–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.1080/10682760410001697822>
14. Miftakhov E.N., Mustafina S.A. [Solution of the Inverse Problem of Forming a Molecular Weight Distribution by A.N. Tikhonov's Regularization Method: Certificate of State Registration of the Program]. No. 2021618232; dec. 05.11.2021; publ. 25.05.2021. (In Russ.)
15. Miftakhov E.N., Mustafina S.A., Nasyrov I.S., Faizova V.Y. Kinetic Heterogeneity of the Catalytic System Based on Gadolinium Chloride Solvate in 1,4-cis-polyisoprene Production. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2022;95(3):423–429. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S004446182203010>
16. Zakharov V.P., Mingaleev V.Z., Berlin A.A., Nasyrov I.Sh., Zhavoronkov D.A., Zakharova E.M. Kinetic Inhomogeneity of Titanium- and Neodymium-Based Catalysts for the Production of cis-1,4-polyisoprene. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2015;9:300–305. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0207401X15030139>
17. Bigaeva L.A., Usmanov A.S., Gaisin F.R., Usmanov S.M. Inverse Problem of Molecular Mass Distribution and Analysis of Distribution Functions. *Bashkir Chemical Journal*. 2014;21(2):65–69. (In Russ.)
18. Ziganshina A., Shiyani D., Ganiev G., Tereshchenko K., Zakharov V., Ulitin N. Controlling the Activity of Particles of $TiCl_4-Al(i-C_4H_9)_3$ Catalytic System by Changing Their Dispersion Composition in the Process of Producing Low-Molar-Mass Polybutadiene – a Component of Sticky Glue. *Polymer Science. Series: D*. 2020;13:365–371. <https://doi.org/10.1134/s199542122004022x>
19. Miftakhov E.N., Mustafina S.A., Nasyrov I.Sh., Mustafina S.I. Modified Method for Solving Inverse Problems of the Formation of Molecular Mass Distribution under the Conditions of the Interval Nature of the Initial Experimental Data. *Bulletin of the Tver State University. Series: Chemistry*. 2022;1(47):102–112. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26456/vtchem2022.1.10>
20. Miftakhov E., Mustafina S., Nasyrov I., Daminov A. Kinetic Heterogeneity of Polymer Products Obtained in the Presence of Microheterogenic Catalytic Systems Based on Gel Chromatograms. *Periodico Tchê Química*. 2021;18(38):27–37. https://doi.org/10.52571/PTQ.v18.n38.2021.03_MIFTAKHOV_pgs_27_37.pdf
21. Bigaeva L.A., Latypov I.I., Usmanov S.M., Nabiullin A.R., Shiyani D.A., Ulitin N.V. On the Problem of Solving the Inverse Ill-posed Problem in the Chemical Technology of Polymers: Interpretation of Gel Chromatograms. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2015;18(3):86–92. (In Russ.)
22. Bello S., Oyedele L., Akinadé O., Bilal M., Davila D., Akanbi L., [et al.]. Cloud Computing in Construction Industry: Use Cases, Benefits and Challenges. *Automation in Construction*. 2020;122:103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>
23. Mustafa C., Zeebaree S. Sufficient Comparison among Cloud Computing Services: IaaS, PaaS, and SaaS: A Review. 2021;5:17–30. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.4481415>
24. Gabriel D., Pedro L., Fernanda P., Daniel L., Scheila A. A Survey of Biological Data in a Big Data Perspective. *Big Data*. 2022;10(4):279–297. <https://doi.org/10.1089/big.2020.0383>
25. Miftakhov E., Mustafina S., Akimov A., Larin O., Gorlov A. Developing Methods and Algorithms for Cloud Computing Management Systems in Industrial Polymer Synthesis Processes. *Emerging Science Journal*. 2021;5(6):964–972. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-01324>
26. Daminov A., Miftakhov E., Mustafina S. SaaS is the Service for Solving Problems of Chemical Kinetics. In: 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2021. p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT52450.2021.9649017>

27. Arantes P., Polêto M., Pedebos C., Ligabue-Braun R. Making it Rain: Cloud-Based Molecular Simulations for Everyone. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 2021;61:4852–4856. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2021-9f2m5>

28. Carsten K., Christian K., Austin C., Ludvig N., Helmut G., Bert L., et al. GROMACS in the Cloud: A Global Supercomputer to Speed Up Alchemical Drug Design. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 2022;62(7):1691–1711. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.2c00044>

Submitted 05.07.2023; revised 01.08.2023; accepted 20.08.2023.

About the authors:

Eldar N. Miftakhov, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0471-5949>, Researcher ID: AAA-5885-2019, Scopus ID: 56178153800, promif@mail.ru

Sofya I. Mustafina, Junior Researcher, Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8036-3001>, Scopus ID: 57204930367, sofiamustafina@mail.ru

Nikolay D. Morozkin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, President of the Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5051-7094>, Scopus ID: 6603118906, morozkinnd@mail.ru

Ildus Sh. Nasyrov, Cand.Sci. (Chemistry), Deputy General Director for Development (for Science), Joint Stock Company Sintez Rubber (14 Tekhnicheskaya St., Sterlitamak 453110, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8273-3651>, Scopus ID: 6603373003, nasyrovish@mail.ru

Svetlana A. Mustafina, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Vice-Rector for Branch Network Development, Head of the Department of Mathematical Modeling, Ufa University of Science and Technology (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6363-1665>, Researcher ID: AAC-3926-2020, Scopus ID: 6603592002, mustafina_sa@mail.ru

Authors contribution:

E. N. Miftakhov – developing methods and algorithms for solving direct problems, conducting computational experiments, writing the text of the article.

S. I. Mustafina – programming of computational methods for organization of calculations

N. D. Morozkin – analyzing the results of the study, reviewing of literary sources.

I. Sh. Nasyrov – planning and organization of the necessary laboratory experiments.

S. A. Mustafina – setting the goal and objectives of the study, planning the necessary computational experiments, analyzing the results.

All authors have read and approved the final manuscript.



Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров

Э. В. Жалнин, М. Е. Чаплыгин[✉]

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)

[✉] misha2728@yandex.ru

Аннотация

Введение. В статье приведены результаты статистического анализа базовых технических параметров современных зерноуборочных комбайнов, образующих выборку из 150 моделей. Предложен новый комплексный критерий оценки технического уровня комбайнов под названием коэффициент гармоничности, по которому можно оценивать степень совершенства конструкции комбайнов и на его основе определять пути их совершенствования.

Цель статьи. Предложить методику расчета коэффициента гармоничности каждого комбайна и выявить направление его совершенствования, исходя из степени соответствия общемировым тенденциям. В статье продолжает развиваться идея гармонизации параметров комбайнов, изложенная в предыдущих публикациях по этой теме.

Материалы и методы. Применен статистический анализ с выявлением однородных статистических выборок по классам комбайнов от 4 до 12 кг/с.

Результаты исследования. На примере выборки из 16 моделей различных комбайнов рассчитаны коэффициенты гармоничности конструкции комбайнов. Применяемые статистические уравнения для расчетов параметров комбайнов отражают общемировые тенденции в развитии конструкций комбайнов и были названы теоретическими, которые затем сравнивались с фактическими параметрами комбайнов. Разница этих параметров определяла направления совершенствования. Выявлены марки комбайнов, у которых высокий коэффициент гармонизации и вместе с тем ряд машин, требующих модернизации.

Обсуждение и заключение. Предложена методика цифровой оценки технического уровня зерноуборочных комбайнов, основанная на трех расчетных критериях: параметрическом индексе, регрессионных зависимостях между параметрами комбайна, отражающих общемировые тенденции их развития, и коэффициенте гармоничности конструкции по параметрам молотильно-сепарирующего устройства. Выявлена группа комбайнов с очень высоким коэффициентом гармоничности – 0,93–0,94. Это прежде всего немецкие машины фирмы Claas (Medion 340, Доминатор 150, Lexion 580), российские – компании «Ростсельмаш» (TORUM 740) и американские – фирмы Massey Ferguson (MF 7278). Выделяется большая группа комбайнов, которые имеют коэффициент гармоничности их конструкции по параметрам ниже 0,9, следовательно, у них есть резервы для совершенствования в соответствии с общемировыми тенденциями. К примеру, машина 5270 C-AL немецкой фирмы Fendt нуждается в увеличении мощности двигателя со 180 л. с. до 252 л. с., снижении площади подбарабана с 1,3 до 0,81 м², увеличении площади соломосепаратора с 5,7 до 7,2 м² и уменьшении площади решет очистки с 6,0 до 5,4 м². При этом пропускная

© Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е., 2023



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

способность останется на уровне 9,1 кг/с. На основе предложенной методики даны рекомендации по совершенствованию ряда наиболее известных комбайнов отечественного и зарубежного производства с учетом общемировых тенденций их развития.

Ключевые слова: класс комбайна, технические параметры комбайнов, технический уровень, коэффициент гармоничности комбайнов

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 403–416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>

Original article

Improving the Design of Combine Harvesters by Harmonizing Their Basic Technical Parameters

E. V. Zhalnin, M. E. Chaplygin✉

Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)

✉ misha2728@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article presents the results of statistical analysis of basic technical parameters of modern combine harvesters, comprising a sample of 150 models. A new complex criterion for assessing the technical level of combine harvesters called the harmonization coefficient is proposed, which makes it possible to evaluate the perfection degree of combine harvester design and identify the ways to improve them.

Aim of the Article. The aim of the study is to propose a methodology for calculating the harmonization coefficient of each combine harvester and to identify the way for its improvement, based on the degree of compliance with global trends. The article continues to develop the idea of harmonization of combine harvester parameters outlined in the previous publications on this topic.

Materials and Methods. There was applied statistical analysis identifying homogeneous statistical samples by harvester classes from 4 to 12 kg/sec.

Results. On the example of a sample of 16 different combine harvester models, the harmonization coefficients of combine harvester design were calculated. The applied statistical equations for calculating combine harvester parameters reflect global trends in the development of combine harvester design and were called theoretical parameters, then they were compared with the actual parameters of combine harvesters. The difference between the theoretical and actual parameters affected the identifying of the ways of improvement. There were identified the combine harvester brands with high harmonization coefficient and a number of combine harvesters requiring modernization.

Discussion and Conclusion. A technique for digital assessment of the technical level of combine harvesters is proposed. It is based on three design criteria: parametric index, regression dependencies between combine parameters reflecting global trends in the combine harvester design, and the harmonization coefficient of the combine harvester design in terms of threshing and separating device parameters. There was identified a group of combine harvesters with a very high harmonization coefficient 0.93–0.94. We mean first of all German harvesters of Claas company (Medion 340, Dominator 150, Lexion 580), Russian harvester of Rostselmash company (TORUM 740) and American Massey Ferguson (MF 7278). There is a large group of combine harvesters, which have a harmonization

coefficient of their design in terms of parameters below 0.9, therefore, they may be improved in accordance with global trends, for example, the 5270 C-AL combine harvester of the German company Fendt needs the increase in engine power from 180 HP to 252 HP, reducing the concave area from 1.3 to 0.81 m², increasing the area of the straw separator from 5.7 to 7.2 m² and reducing the area of the cleaning sieves from 6.0 to 5.4 m². At the same time, the combine harvester throughput efficiency will remain at the level of 9.1 kg/s. Based on the proposed methodology, there are given recommendations for improving a number of the most famous combine harvesters of domestic and foreign production, taking into account global trends in their development.

Keywords: combine harvester class, technical parameters of combine harvesters, technical level, harmonization coefficient of combine harvesters

Acknowledgements: The authors would like to express their gratitude to the reviewers, whose critical evaluation of the presented materials and suggestions for their improvement contributed significantly to the quality of this article.

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

For citation: Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the Design of Combine Harvesters by Harmonizing Their Basic Technical Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):403–416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>

Введение

При массовом внедрении в сельскохозяйственное производство зерноуборочных комбайнов возникла необходимость в их классификации на определенные группы, классы, типы и т. п. Известны комбайны по назначению: зерноуборочные, кукурузоуборочные, кормоуборочные и т. п. По агрегатированию с энергоисточником они делятся на прицепные, самоходные, навесные и т. д. Применяемая классификация больше отражает назначение или принцип технологического процесса, чем технический уровень. Количественной оценки технического уровня долго не было. Предпринималась попытка использовать ширину захвата жатки в метрах, например комбайны С-4, С-4М, или длину молотильного барабана в мм: Дон-1200, Дон-1500, Енисей-900.

Современная классификация зерноуборочных комбайнов на классы основана на ряде научных исследований [1–4], которые за признак классификации комбайнов предложили принять пропускную

способность комбайна – т. е. чистую производительность комбайна в кг зерна, обмолоченного в молотилке комбайна за 1 сек. при отношении массы зерна к массе соломы 1 : 1,5, потерях зерна не более 1,5 % и дроблении зерна не более 2 %. Это была первая научно обоснованная цифровая классификация зерноуборочных комбайнов.

Обзор литературы

Аналитический обзор проблематики показал, что проблемам выбора параметров комбайнов и их конструирования посвящено большое количество публикаций. Наиболее значимы для теории и практики комбайностроения были работы В. П. Горячкина¹, М. А. Пустыгина², В. Г. Антипина³, С. А. Алферова [1], Б. Г. Турбина [5], Э. И. Липковича [6], Н. И. Клена [7], А. И. Русанова [8; 9], В. В. Лемешко [10], А. Д. Логина [11], К. С. Орманджи [12], В. Червинки [13] и ряда других исследователей. Однако принцип гармонизации параметров комбайнов был предложен только в одной работе [14].

¹ Горячкин В. П. Земледельческая механика. Полн. собр. соч. в 7 т. М. : Сельхозгиз, 1937–1949 гг.

² Пустыгин М. А. Теория и технологический расчет молотильных устройств. Сельхозгиз, 1948.

³ Антипин В. Г. Определение пропускной способности зерноуборочных комбайнов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1963. № 1.

Предлагаемая статья является творческим развитием ранее выполненных работ в этом направлении. В иностранной литературе не было найдено ни одной научной публикации в открытых источниках, связанной с изучением данной проблематики или научного направления, которому посвящена статья.

Большая группа исследователей занималась поисками закономерности связи пропускной способности комбайнов и их конкретными параметрами [6–8; 15–18] и, наоборот, определением пропускной способности комбайна по исходным параметрам молотилки [9–11]. Причем в основном ограничивались линейными размерами параметров. В связи с этим надо отдать должное заслуге американского ученого В. Червинки, который доказал, что самый высокий коэффициент корреляции с пропускной способностью комбайна (производительностью) имеют не линейные размеры рабочих органов молотилки, а проективные площади обмолота и сепарации [13]. В итоге удалось обосновать новый критерий технического уровня комбайнов (i_k – параметрический индекс) и показать его влияние на пропускную способность комбайна [19–21].

Современная мировая комбайностроительная отрасль характеризуется производством большого количества различных моделей комбайнов и их модификаций. Это вызвано естественным большим спросом сельхозпроизводителей на разнообразную технику применительно к своим природно-агроклиматическим и агроландшафтным условиям производства сельхозпродукции. По проспектным данным разных фирм производителей комбайнов известно почти 150 наиболее распространенных моделей комбайнов. Все они отличаются габаритами, массой, мощностью двигателя, параметрами молотильно-сепарирующего устройства и т. д. На первый взгляд может показаться, что если комбайны все разные, то и нет никакой логической

и математической связи между их параметрами.

Каждый конструктор на свое усмотрение и понимание выбирает параметры проектируемых комбайнов. Часто этот выбор является простым следованием традиционным особенностям той или иной фирмы. Единой методики выбора нужных параметров нет, несмотря на обилие частных уравнений. Первая попытка разработать такую методику была предпринята в работе В. Червинки [13].

Оказалось, что применив статистический анализ большой совокупности разных комбайнов, можно выявить достаточно однородную выборку машин с устойчивой регрессионной связью между параметрами, это характеризуется приемлемым значением коэффициента вариации этой выборки (менее 10–15 %). На этом основании мы предложили статистические зависимости между параметрами считать теоретическими, а отклонения фактических значений параметров от этих теоретических значений определяют степень гармонизации конкретной модели комбайна с общемировыми тенденциями. В итоге это даст возможности определить пути совершенствования создания комбайнов.

Материалы и методы

Методика исследований состоит в том, что за основу принята выборочная совокупность комбайнов из более 150 известных моделей и выполнена статистическая обработка фактических и расчетных параметров комбайнов с определением путей их совершенствования. Расчетные параметры названы теоретическими, так как они соответствуют общемировым тенденциям развития параметров комбайнов.

Фактические параметры серийных комбайнов нами представлены в виде генеральной статистической совокупности, но единую однородную выборку значений этих параметров привести невозможно. По каждому параметру

выявлена отдельная последовательность, несопоставимая с последовательностью по другому параметру. Нет смысла также определять среднее значение по всей совокупности значений параметров более 150 моделей комбайнов. Совокупность их параметров не представляет собой единую однородную статистическую выборку. Выход был найден в том, что комбайны сравнивались не по отдельным параметрам, а по производительности в час чистого времени, т. е. по пропускной способности в кг/с, являющейся функцией базовых параметров любого комбайна: мощность двигателя и площади сепарации подбарабанья, соломотряса и очистки.

Исследуемые комбайны по пропускной способности были выделены в три группы: до 4 кг/с, 4–9 кг/с и более 9 кг/с, включая классические и аксиально-роторные комбайны. На примере выборочных 16 из 150 моделей показана методика расчета теоретических параметров и предложены пути корректировки фактических (проспектных) параметров. В целом отмечено, что многие фирмы производят комбайны с достаточно высоким коэффициентом гармоничности параметров в пределах 0,9–0,94. По некоторым комбайнам других фирм проблема гармонизации параметров является актуальной, особенно при коэффициенте гармонизации менее 0,85. По каждой из 16 моделей комбайнов даны рекомендации по желательной корректировке фактических параметров. К примеру, в комбайне 5270C-AL фирмы Fendt (Германия) предлагается повысить мощность двигателя со 180 до 252 л. с., площадь соломотряса – с 5,7 до 7,2 м², а площадь развертки подбарабанья в размере 1,3 м² является излишней, достаточно 0,81 м². Площадь решет очистки уменьшить с 6,0 до 5,4 м². При этих изменениях пропускная способность остается на уровне 9 кг/с. В отечественном комбайне Вектор 410 площадь развертки подбарабанья

является завышенной, а площадь соломотряса и решет очистки – заниженной в сравнении с общемировыми тенденциями для такого класса комбайнов. Подобный анализ сделан и по другим комбайнам.

Результаты исследования

Предлагаемая методика поиска направлений совершенствования конструкции зерноуборочных комбайнов состоит из последовательности следующих информационно-расчетных операций.

1. Составление общей картотеки по комбайнам с указанием страны-производителя, фирмы, марки базовых моделей и их модификаций. Модификации нужны для общей оценки производственной мощности фирмы-изготовителя и ее конкурентоспособности на мировом рынке комбайнов.

2. Составление параметрической картотеки по комбайнам с указанием по каждой базовой модели фактической мощности двигателя N_e , площади подбарабанья F_n , соломотряса F_c , и площади решет F_p . Указанные в проспектах значения некоторых параметров желательно уточнить у фирмы-производителя, так как отмечены случаи неточных данных в проспектах.

3. Расчет параметрического индекса для каждого комбайна по формулам:

– для комбайна с классической (барабанной) схемой молотилки:

$$i_k = \frac{1}{4} \left[\frac{N_e}{32} + \frac{F_n}{0,26} + \frac{F_c}{1,5} + \frac{F_p}{0,8} \right]; \quad (1)$$

– для комбайна с аксиально-роторной схемой молотилки:

$$i_k = \frac{N_e}{126} + 0,5(F_{nc} + F_p), \quad (2)$$

где i_k – параметрический индекс для каждого комбайна; F_{nc} – площадь развертки подбарабанья ротора, включая молотильную и сепарирующую секции.

4. Определение расчетной пропускной способности комбайна по формуле:

$$q_k = 1,83i_k - 0,83, \quad (3)$$

где q_k – расчетная пропускная способность комбайна кг/с.

5. По расчетной пропускной способности (3) с использованием фактических значений параметров (1) определяем теоретические (статистические) параметры комбайнов, отражающие мировые тенденции в развитии базовых комбайнов с ошибкой не более 10 %.

5.1. Мощность двигателя, л. с.

при $q_k < 1,5$ кг/с $N_{\text{ет}} = 36 \cdot q_k, \quad (4)$

q_k до 9,0 кг/с $N_{\text{ет}} = 28,4 \cdot q_k, \quad (5)$

$q_k > 9,0$ кг/с $N_{\text{ет}} = 42,2 \cdot q_k - 97. \quad (6)$

5.2. Площадь развертки подбарабанья, м²

$$F_{\text{пт}} = \frac{FR\alpha}{180} \cdot B = 0,07q_k + 0,19$$

(бильный барабан), (7)

$$F_{\text{пт}} = 0,24 \cdot q_k + 0,37$$

(аксиально-роторный барабан), (8)

где R – радиус барабана, м; α – угол обхвата подбарабанья, °; B – длина барабана, м.

5.3. Площадь соломотряса, м²

$$F_{\text{ст}} = 0,72 \cdot q_k + 0,78. \quad (9)$$

5.4. Площадь решет очистки, м²

$$F_{\text{пр}} = 0,58 \cdot q_k + 0,2. \quad (10)$$

6. Расчет соотношения фактических параметров и теоретических (статических)

$$\Pi_i = \frac{\Pi_{\text{фи}}}{\Pi_{\text{ти}}} \quad (11)$$

7. Расчет коэффициента гармоничности комбайнов по базовым параметрам $N_e, F_{\text{пт}}, F_c, F_p$.

$$K_{\text{гар}} = 1 - \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{\Pi_{\text{фи}}}{\Pi_{\text{ти}}} \right]^2}, \quad (12)$$

где n – общее количество базовых параметров; $\Pi_{\text{фи}}$ и $\Pi_{\text{ти}}$ – соответственно фактическое значение параметров по проспектам фирм-изготовителей и теоретическое по формулам (1)–(10).

8. Выбор моделей комбайнов с минимальным значением коэффициента гармоничности $K_{\text{гар}}$ (менее 0,9).

9. Из группы комбайнов с $K_{\text{гар}} < 0,9$ составляется картотека соотношений параметров (11).

10. Производится анализ соотношений (11) и определяются направления совершенствования базовых параметров.

При $\Pi_i > 1$ фактические параметры завышены по сравнению с теоретическими в соответствии с общемировым трендом, а при $\Pi_i < 1$ – занижена, что в любом случае является основанием для совершенствования молотильно-сепарирующих органов комбайна.

Последовательность расчетных операций (1)–(10) в итоге ее реализации доказывает: принятая за основу научная гипотеза, что чем ближе фактические параметры комбайна к статистическим в однородной выборке, тем выше степень гармоничности параметров комбайна и тем совершенней его конструкция, получила подтверждение.

Нарушение этого требования приводит к непропорциональным параметрам комбайна между собой, а в итоге к нарушению ритма технологического процесса обмолота и сепарации, повышению нерализуемости мощности двигателя, увеличению массы комбайна и его стоимости. То есть площади подбарабанья, молотильного барабана, а отсюда и диаметр

барабана, длина и угол обхвата, должны соответствовать площади соломотряса и очистительных решет, а мощность двигателя должна быть достаточной для обмолота и сепарации на этой площади, а также для передвижения комбайна. Например, непропорциональность увеличения площади подбарабана приводит к повышению перебарыванию незерновой части урожая, что затрудняет нормальное выполнение процесса сепарации зерна на остальных рабочих органах комбайна.

Поиск подобных непропорциональностей составляет основную задачу гармонизации параметров комбайнов в направлении их совершенствования в соответствии с общемировыми тенденциями.

Следует заметить, что формулы (1)–(10) не могут быть абсолютно стабильными по времени. Сейчас они отражают тот большой статистический материал, который был накоплен на наших машиноиспытательных станциях, и более адекватны базовым моделям современных комбайнов. С течением времени по мере комплексного совершенствования комбайнов и технологических схем обмолота и сепарации они, конечно, могут измениться, но идея гармонизации по их параметрам все равно останется актуальной. В частности, приведенные здесь зависимости несколько уточнены в сравнении с теми, которые приведены в публикации [14]. Вполне возможно, что появятся адекватные уравнения по зависимостям массы комбайна, вместимости бункера, универсальности применения, надежности и т. п. в функции пропускной способности комбайна. Например, для аксиально-роторных комбайнов получены уравнения после статистической обработки, но с намного меньшей выборкой по сравнению с выборками по классическим комбайнам. Несомненно, этот недостаток в будущем будет устранен, так как аксиально-роторные комбайны находят все большее применение. К тому же в перспективе возможно увеличение

производства комбайнов с комбинированными молотилками: бильное молотильное устройство и аксиально-роторные соломосепараторы и т. п.

Приведем примеры конкретной реализации предложенной методики поиска путей совершенствования комбайнов.

В таблице представлена выборка из 150 моделей в составе 16 моделей комбайнов с разным значением коэффициентов гармоничности $K_{\text{гар}}$. Результаты расчетных данных по таблице дают возможность сделать ряд важных рекомендаций по совершенствованию комбайнов. Как видно, $K_{\text{гар}}$ у представленных комбайнов находится в интервале от 0,70 до 0,94.

Первое – выявлена группа комбайнов с очень высоким коэффициентом гармоничности – 0,93–0,94. Это прежде всего немецкие машины фирмы Claas (Medion 340, Dominator 150, Lexion 580). Российский комбайн компании «Ростсельмаш» (TORUM 740) и американские Massey Ferguson (MF 7278).

Второе – выделяется большая группа комбайнов, которые имеют коэффициент гармоничности их конструкции по параметрам ниже 0,9, следовательно, у них есть резервы для совершенствования в соответствии с общемировыми тенденциями.

Комбайн 5270 C-AL немецкой фирмы Fendt нуждается в увеличении мощности двигателя со 180 до 252 л. с., снижения площади подбарабана с 1,3 до 0,81 м², увеличении площади соломосепаратора с 5,7 до 7,2 м² и уменьшении площади решет очистки с 6,0 до 5,4 м². При этом пропускная способность комбайна останется на уровне 9,1 кг/с.

У отечественного комбайна СК-5 «Нива-Эффект» была завышена площадь подбарабана и занижена площадь решет очистки. Примерно такая же ситуация с комбайном Вектор 410, Дон-1500Б и ACROS 595. Отметим, что данные марки комбайнов еще эксплуатируются на сельхозпредприятиях страны.

Таблица
Table

**Фактические (проспектные) и расчетные параметры зерноуборочных комбайнов
(статистическая однородная выборка из 150 моделей комбайнов)
Actual (prospective) and estimated parameters
of combine harvesters (statistical homogeneous sample of 150 combine harvester models)**

№ п/п	Модель комбайна, фирма, страна / Combine model, company, country	Технологические параметры комбайнов / Technological parameters of combine harvesters							
		Варианты / Variants	Мощность двигателя / Engine power N_e , л.с.	Площадь подбарабана / Square of drumming F_{np} , M^2	Площадь солоотраса / Square the straw separator F_s , M^2	Площадь решета очистки / Square cleaning sieve F_{ps} , M^2	Параметрический индекс / Parametric index i_k	Пропускная способность / Bandwidth q_k , кг/с	Коэффициент гармоничности / Harmonization Coefficient $K_{гп}$
1	Medion 340 Claas (Германия / Germany)	Факт / Fact Расчетная / Estimated Соотношение / Ratio	333 312 1,07	0,70 0,87 0,80	7,00 7,76 0,90	5,10 5,80 0,88	8 8 0,90	9,70 10,30 0,90	10 0,93
2	Dominator 150 Claas (Германия / Germany)	Факт / Fact Расчетная / Estimated Соотношение / Ratio	141 133 1,06	0,40 0,52 0,77	4,20 4,20 1,00	3,00 2,93 1,02	3,00 3,00 1,00	4,70 4,70 1,00	0,94
3	Lexion 580 Claas (Германия / Germany)	Факт / Fact Расчетная / Estimated Соотношение / Ratio	430 388 1,10	0,90 1,00 0,90	7,40 9,00 0,82	5,80 6,90 0,84	6,70 7,30 0,92	11,50 12,60 0,91	0,93
4	5270 C / 5270 C-AL Fendt (Германия / Germany)	Факт / Fact Расчетная / Estimated Соотношение / Ratio	180 252 0,71	1,30 0,81 1,60	5,70 7,20 0,79	6,00 5,40 1,11	5,30 5,40 0,98	8,90 9,00 0,99	0,76

Продолжение таблицы / End of table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	ТС-54 New-Holland (США / USA)	Факт / Fact	170	0,70	4,00	3,30	3,60	5,70	0,86
		Расчетная / Estimated	162	0,60	4,90	3,50	3,60	5,70	
6	СК-5 МЭ-1 «Нива- Эффект» Ростсельмаш (Россия / Russia)	Соотношение / Ratio	1,05	1,17	0,82	0,94	1,00	1,00	
		Факт / Fact	145	0,92	4,34	2,42	3,36	5,30	0,83
7	NOVA-340 Ростсельмаш (Россия / Russia)	Расчетная / Estimated	150	0,56	4,60	3,27	3,36	5,30	
		Соотношение / Ratio	0,97	1,64	0,94	0,74	1,00	1,00	
8	Вектор 410 Ростсельмаш (Россия / Russia)	Факт / Fact	180	0,93	4,34	3,59	4,00	6,50	0,87
		Расчетная / Estimated	184,6	0,64	5,46	3,97	4,05	6,60	
9	Дон-1500Б Ростсельмаш (Россия / Russia)	Соотношение / Ratio	0,97	1,45	0,79	0,90	0,99	0,98	
		Факт / Fact	210	1,10	5,00	3,60	4,47	7,40	0,85
10	ACROS 530 Ростсельмаш (Россия / Russia)	Расчетная / Estimated	210,2	0,71	6,10	4,50	4,56	7,50	
		Соотношение / Ratio	1,00	1,55	0,82	0,80	0,98	0,98	
9	Дон-1500Б Ростсельмаш (Россия / Russia)	Факт / Fact	235	1,36	6,15	4,74	5,44	9,10	0,82
		Расчетная / Estimated	258	0,83	7,30	5,50	5,52	9,30	
10	ACROS 530 Ростсельмаш (Россия / Russia)	Соотношение / Ratio	0,91	1,64	0,84	0,86	0,98	0,98	
		Факт / Fact	250	1,38	6,15	4,74	5,57	9,36	
10	ACROS 530 Ростсельмаш (Россия / Russia)	Расчетная / Estimated	266	0,84	7,52	5,63	5,67	9,55	
		Соотношение / Ratio	0,94	1,64	0,82	0,84	0,98	0,98	

Окончание таблицы / End of table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	ACROS 595 Ростсельмаш (Россия / Russia)	Факт / Fact Расчетная / Estimated	325 350	1,38 0,93	6,30 8,40	5,20 6,30	6,25 6,70	10,60 11,40	0,86
		Соотношение / Ratio	0,93	1,48	0,75	0,83	0,93	0,93	
12	TORUM 740 Ростсельмаш (Россия / Russia)	Факт / Fact Расчетная / Estimated	400 416	3,10 3,40	– –	5,20 6,50	7,32 7,67	12,60 13,20	0,94
		Соотношение / Ratio	0,96	0,91	–	0,80	0,95	0,95	
13	Sampo Rosenlew SR2010 (Финляндия / Finland)	Факт / Fact Расчетная / Estimated	83,0 54,7	0,30 0,31	1,40 2,05	0,70 1,20	1,39 1,44	1,71 1,80	0,82
		Соотношение / Ratio	1,51	0,97	0,68	0,58	0,96	0,95	
14	CS 660 New-Holland (США / USA)	Факт / Fact Расчетная / Estimated	282 274	1,00 0,81	4,20 7,10	5,20 5,30	5,20 5,50	8,80 9,30	0,88
		Соотношение / Ratio	1,03	1,23	0,60	0,98	0,95	0,95	
15	MF 7278 «Cereas» (США / USA)	Факт / Fact Расчетная / Estimated	388 384	0,90 0,99	8,80 9,00	5,30 6,60	6,70 7,20	11,40 12,30	0,94
		Соотношение / Ratio	1,01	0,91	0,98	0,80	0,93	0,93	
16	296 LCS Laverda (Италия / Italy)	Факт / Fact Расчетная / Estimated	235 230	1,00 0,76	5,40 6,60	4,50 4,90	4,90 5,00	8,10 8,20	0,90
		Соотношение / Ratio	1,02	1,30	0,80	0,90	0,98	0,98	

В комбайне Sampo Rosenlew SR2010 (Финляндия) установленный двигатель мощностью 83 л. с. полностью не реализует свою мощность и также нуждается в увеличении площади соломосепарации и решет очистки. В комбайне CS 660 New-Holland (США) мощности двигателя достаточно для реализации фактической производительности, но для повышения устойчивости технологического процесса необходимо увеличение площади соломосепаратора при уменьшении площади подбарабаша с 1,0 до 0,81 м². Примерно такая же ситуация с комбайнами LCS 296 итальянской фирмы Laverda.

По приведенной методике расчета можно пересчитать параметры всех остальных комбайнов из имеющихся 150 моделей. Подобный анализ технического уровня зерноуборочных комбайнов по другим известным методикам сделать невозможно.

Обсуждение и заключение

1. Предложена методика цифровой оценки технического уровня зерноуборочных комбайнов, основанная на трех расчетных критериях: параметрическом индексе, регрессионных зависимостях между параметрами комбайна, отражающих общемировые тенденции их развития и коэффициенте гармоничности конструкции комбайна по

параметрам молотильно-сепарирующего устройства.

2. Выявлена группа комбайнов с очень высоким коэффициентом гармоничности – 0,93–0,94. Это прежде всего немецкие комбайны фирмы Claas (Medion 340, Доминатор 150, Lexion 580), российский комбайн компании «Ростсельмаш» (TORUM 740) и американский Massey Ferguson (MF 7278). Выделяется большая группа комбайнов, которые имеют коэффициент гармоничности их конструкции по параметрам ниже 0,9, следовательно, у них есть резервы для совершенствования в соответствии с общемировыми тенденциями, к примеру комбайн 5270 C-AL немецкой фирмы Fendt нуждается в увеличении мощности двигателя со 180 до 252 л. с., снижения площади подбарабаша с 1,3 до 0,81 м², увеличении площади соломосепаратора с 5,7 до 7,2 м² и уменьшении площади решет очистки с 6,0 до 5,4 м², при этом пропускная способность комбайна останется на уровне 9,1 кг/с.

3. На основе предложенной методики даны рекомендации по совершенствованию ряда наиболее известных комбайнов отечественного и зарубежного производства с учетом общемировых тенденций их развития. Разработанную методику можно также использовать при проектировании новых комбайнов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов С. А., Брагинец В. С. Обмолот и сепарация зерна в молотильных устройствах как единый вероятностный процесс // Тракторы и сельхозмашины. 1972. № 4. С. 23–26.
2. Антипин В. Г. Пропускная способность зерноуборочного комбайна // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1973. № 1. С. 9–11.
3. Пустыгин М. А. Развитие зерноуборочных комбайнов и средств для уборки соломы // Тракторы и сельхозмашины. 1965. № 8. С. 17–20.
4. Жалнин Э. В. Методологические и технологические решения проблемы комплексной механизации уборки зерновых культур в условиях интенсивного зернопроизводства : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1987.
5. Сельскохозяйственные машины : теория, конструкция и расчет / под ред. проф. Б. Г. Турбина. М. ; Л. : Машгиз. (Ленингр. отд-ние), 1963. 575 с.

6. Липкович Э. И. Процессы обмолота и сепарации в молотильных аппаратах зерноуборочных комбайнов : пособие для конструкторов зерноуборочных машин / ВНИПТИМЭСХ. Зерноград, 1973. 168 с.
7. Кленин Н. И. Исследование вымолота и сепарации зерна : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1977.
8. Русанов А. И. Расчет пропускной способности зерноуборочных комбайнов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1976. № 12.
9. Русанов А. И. Расчет пропускной способности и производительности зерноуборочных комбайнов // Тракторы и сельхозмашины. 1988. № 12. С. 20–23.
10. Лемешко В. В. Обобщенный показатель МСУ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1973. № 2. С. 49–50.
11. Логин А. Д. К определению пропускной способности МСУ новых зерноуборочных комбайнов с применением методов, теории подобия // Труды Новосибирского СХИ. 1972. Т. 60.
12. Орманджи К. С. Тенденция развития комбайностроения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1971. № 2.
13. Червинка В. Применение методов регрессионного анализа для прогнозирования тенденций комбайностроения // Trans. ASAE. 1974. Т. 17, № 2.
14. Жалнин Э. В. Расчет основных параметров зерноуборочных комбайнов с использованием принципа гармоничности их конструкции. М. : ВИМ, 2011. 104 с.
15. Пустьгин М. А. Закономерности сепарации зерна в молотильно-сепарирующих устройствах // Труды ВИСХОМ. 1977. Вып. 88.
16. Баев В. В. Обоснование параметров молотилки зерноуборочного комбайна методом имитационного моделирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1986.
17. Плешаков В. Н. Обоснование технического уровня и направлений развития сельскохозяйственной техники : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Краснодар, 2001.
18. Стружкин Н. И., Жалнин Э. В., Гольяпин В. Е. Динамика математических моделей для расчета параметров зерноуборочных комбайнов // Техника в сельском хозяйстве. 2005. № 6.
19. Жалнин Э. В. Расчет основных параметров зерноуборочных комбайнов. М. : ВИМ, 2001.
20. Семенов В. А., Семенова Е. И. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов : сб. трудов по материалам международной научно-практической конференции. М., 2017. С. 280–284.
21. Липская В. К. Методические рекомендации по выбору прямых аналогов сельскохозяйственных машин на примере зерноуборочных комбайнов // Проблемы экономики : сб. научных трудов. Горки, 2021. № 1 (32). С. 95–109.

Поступила 27.04.2023; одобрена после рецензирования 07.06.2023; принята к публикации 02.08.2023.

Об авторах:

Жалнин Эдуард Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом технологий и оборудования для зерновых, зернобобовых и масличных культур Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

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

Заявленный вклад авторов:

Э. В. Жалнин – научное руководство, разработка теоретических предпосылок, формулирование основной концепции исследования ее целей и задач, доработка текста, формирование общих выводов.

М. Е. Чаплыгин – подготовка первоначального варианта текста, анализ литературных источников, визуализация, доработка текста и оформление материалов, формирование частных и общих выводов, итоговая переработка статьи по замечаниям рецензентов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Alferov S.A., Braginets V.S. [Threshing and Separation of Grain in Threshing Devices as a Single Probabilistic Process]. *Traktory i selkhoz mashiny*. 1972;(4):23–26. (In Russ.)
2. Antipin V.G. [Grain Harvester Throughput Capacity]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 1973;(1):9–11. (In Russ.)
3. Pustygin M.A. [Development of Combine Harvesters and Straw Harvesting Facilities]. *Traktory i selkhoz mashiny*. 1965;(8):17–20. (In Russ.)
4. Zhalnin E.V. [Methodological and Technological Solutions to the Problem of Complex Mechanization of Grain Crops Harvesting in Conditions of Intensive Grain Production]. Dr.Sci. Thesis. Moscow; 1987. (In Russ.)
5. [Agricultural Machinery: Theory, Design and Calculation]. Ed. by B.G. Turbin. Moscow; Leningrad: Mashgiz.; 1963. (In Russ.)
6. Lipkovich E.I. Threshing and Separation Processes in Threshing Devices of Combine Harvesters (Manual for Designers of Combine Harvesters). Zernograd: VNIPTIMESKh; 1973. (In Russ.)
7. Klenin N.I. [Research on Threshing and Grain Separation]. Abstract of Dr.Sci. Thesis. Moscow; 1977. (In Russ.)
8. Rusanov A.I. [Calculation of Throughput Capacity of Combine Harvesters]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 1976;(12). (In Russ.)
9. Rusanov A.I. [Calculation of Throughput and Productivity of Combine Harvesters]. *Traktory i selkhoz mashiny*. 1988;(12):20–23. (In Russ.)
10. Lemeshko V.V. [Generalized MSU Indicator]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 1973;(2):49–50. (In Russ.)
11. Login A.D. [Determination of MSU Throughput Capacity of New Combine Harvesters Using Similarity Theory Methods]. *Trudy Novosibirskogo SKhI*. 1972;60. (In Russ.)
12. Ormandzhi K.S. [Development Trend in the Combine Industry]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 1971;(2). (In Russ.)
13. Cervinka V. Application of Regression Analysis Methods for Forecasting Trends in the Combine Industry. *Trans. ASAE*. 1974;17(2). (In Russ.)
14. Zhalnin E.V. [Calculation of the Main Parameters of Combine Harvesters Using the Principle of Harmony of Their Design]. Moscow: VIM; 2011. (In Russ.)
15. Pustygin M.A. [Laws of Grain Separation in Threshing and Separating Devices]. *Trudy VISKhOM*. 1977;(88). (In Russ.)
16. Baev V.V. [Justification of Grain Harvester Thresher Parameters by Simulation Modeling Method]. Abstract of Cand. Sci. Thesis. Krasnodar; 1986. (In Russ.)
17. Pleshakov V.N. [Justification of Technical Level and Directions of Agricultural Machinery Development]. Abstract of Dr.Sci. Thesis. Krasnodar: KubGAU; 2001. (In Russ.)
18. Struzhkin N.I., Zhalnin E.V., Golyapin V.Ye. [Dynamics of Mathematical Models for Calculating Parameters of Combine Harvesters]. *Tekhnika v selskom khozyaystve*. 2005;(6). (In Russ.)
19. Zhalnin E.V. [Calculation of the Main Parameters of Combine Harvesters]. Moscow: VIM; 2001. (In Russ.)
20. Semenov V.A., Semenova Ye.I. [Improving the Design of Combine Harvesters]. In: *Sbornik trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow; 2017. p. 280–284. (In Russ.)

21. Lipskaya V.K. [Methodical Recommendations on the Selection of Direct Analogs of Agricultural Machines on the Example of Combine Harvesters] In: Problemy ekonomiki: sbornik nauchnykh trudov. Gorki; 2021;(1):95–109. (In Russ.)

Submitted 27.04.2023; revised 07.06.2023; accepted 02.08.2023.

About the authors:

Eduard V. Zhalnin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Technology and Equipment Department for Grain, Grain Legumes and Oilseeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: [AAG-1285-2021](https://orcid.org/0000-0002-5467-0654), zhalnin@yandex.ru

Mikhail E. Chaplygin, Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Technology and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seed, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: [AAZ-6056-2020](https://orcid.org/0000-0003-0031-6868), misha2728@yandex.ru

Authors contribution:

E. V. Zhalnin – scientific guidance, development of theoretical background, formulation of the main concept of the research its goals and objectives, finalization of the text, formation of general conclusions.

M. E. Chaplygin – preparation of the initial version of the text, analysis of literary sources, visualization, revision of the text and design of materials, formation of private and general conclusions, final revision of the article according to the reviewers' comments.

All authors have read and approved the final manuscript.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 631.365.34:001.8

doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.417-434


Оригинальная статья



Исследование влияния режимных параметров ленточной ИК-сушилки на кинетику процесса сушки моркови

А. В. Гаврилов , **Ю. Б. Гербер**

*Агротехнологическая академия Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
(г. Симферополь, Российская Федерация)*

 tehfac@mail.ru

Аннотация

Введение. При конвективной сушке возникает противоречие между скоростью сушки и энергоэффективностью. Одно из решений этого противоречия – использование адресного подведения энергии к продукту. Таким методом адресного подвода энергии является применение в процессе сушки электромагнитного излучения. ИК-излучение позволяет передать энергию непосредственно к продукту, избегая нагрева больших объемов промежуточного теплоносителя (сушильного агента).

Цель статьи. Получить коэффициенты логарифмической модели для расчета производительности ленточной ИК-сушильной установки для сушки моркови.

Материалы и методы. Исследования проводились на модульной ленточной ИК-сушилке с возможностью регулирования скорости ленты и мощности излучателей. Для описания процесса использованы стандартные модели зависимости относительного влагосодержания от времени сушки.

Результаты исследования. Анализ кривых скорости сушки показал наличие влияния экстремального характера скорости ленты на скорость сушки. При скоростях ленты выше 10 мм/с увеличение скорости приводит к увеличению продолжительности процесса сушки. Для описания кинетики процесса сушки при значениях мощности ИК-излучения 170, 300 и 450 Вт была использована логарифмическая модель, как наиболее адекватно описывающая экспериментальные данные.

Обсуждение и заключение. Рекомендуется использовать в сушилке данного типа скорость ленты около 10 мм/с. Полученные коэффициенты логарифмической модели используются для расчета производительности установки. Целесообразно получить аналогичные данные для определения рациональных параметров процесса сушки сжогого плодово-овощного сырья и исследовать комбинированное влияние ИК- и СВЧ-излучения на кинетику и энергетику процесса сушки.

© 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.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, коэффициент диффузии, влагосодержание, ленточная сушилка, скорость ленты, кинетика процесса сушки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Исследование влияния режимных параметров ленточной ИК-сушилки на кинетику процесса сушки моркови // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 417–434. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.417-434>

Original article

Investigating the Influence of the Belt IR Dryer Regime Parameters on Kinetics of Carrot Drying Process

A. V. Gavrilo[✉], Yu. B. Gerber

Academy Agrotechnological of the V. I. Vernadsky
Crimean Federal University (Simferopol, Russian Federation)

✉ tehfac@mail.ru

Abstract

Introduction. In the process of convective drying, there is a contradiction between drying speed and energy efficiency. One of the solutions to this contradiction is the use of targeted energy supply to the product. The method of targeted energy supply is the use of electromagnetic radiation in the drying process.

Aim of the Article. The study was aimed at obtaining the coefficients of a logarithmic model for calculating the performance of a belt IR dryer for drying carrots.

Materials and Methods. There were studied a modular belt IR dryer with the ability to control the speed of the belt and the power of the emitters. To describe the process, there were used standard models of the dependence of relative water content on drying time.

Results. An analysis of the drying rate curves showed an extreme effect of the belt speed on the drying rate. At belt speeds above 10 mm/s, an increase in belt speed leads to an increase in the duration of the drying process. To describe the kinetics of the drying process at IR powers of 170, 300, and 450 W, there was used a logarithmic model, as it most adequately describes the experimental data.

Discussion and Conclusion. For this type of dryers it is recommended to use the belt speed of about 10 mm/sec. The obtained coefficients of the logarithmic model are used to calculate the capacity of the drying unit.

Keywords: infrared drying, diffusion coefficient, water content, belt dryer, belt speed, the kinetics of the drying process

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

For citation: Gavrilo A.V., Gerber Yu.B. Investigating the Influence of the Belt IR Dryer Regime Parameters on Kinetics of Carrot Drying Process. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):417–434. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.417-434>

Введение

В настоящее время большая часть обезвоженных фруктов и овощей производится методом конвективной сушки, который является наиболее простым. Однако конвективные способы связаны

с перемещением значительных объемов теплоносителя. Выбросы теплового отработавшего теплоносителя предопределяют низкую эффективность использования энергетических ресурсов. Совершенствование способов подвода

тепла непосредственно связано с интенсификацией теплообмена и снижением удельных расходов тепла. Традиционным способом интенсификации процессов теплообмена при конвективной сушке является увеличение температуры и расхода сушильного агента. В современных конвективных сушилках температура сушильного агента обычно лимитируется предельной температурой нагрева сырья. Повышение скорости движения сушильного агента, с одной стороны, интенсифицирует процессы теплообмена продукта с сушильным агентом, а с другой – приводит к повышению потерь теплоты с отработанным сушильным агентом. Таким образом, возникает противоречие между скоростью конвективной сушки и ее энергоэффективностью. Кроме того, при конвективной сушке в продукте возникает температурный градиент, направленный в сторону, противоположную градиенту влагосодержания, что также замедляет процесс конвективной сушки.

Совершенствование методов подвода теплоносителя – одна из возможностей повышения эффективности организации сушильных процессов. Перспективным путем такого совершенствования представляется организация непосредственной доставки энергии к продукту или даже к влаге, находящейся в продукте без использования промежуточного теплоносителя. Такую доставку можно организовать, используя электромагнитное излучение инфракрасного диапазона. Для организации непрерывного процесса ИК-сушки удобно использовать ленточные сушилки с ИК-модулями. Алгоритмы проектирования промышленных образцов сушилок должны учитывать прерывистый характер энергоподвода и особенности массопередачи с учетом конструктивных особенностей конкретного оборудования. Цель работы – создание моделей кинетики процесса сушки с целью определения влияния режимных

параметров на время ИК-сушки в комбинированной ленточной сушилке, позволяющей реализовать при необходимости ИК-, СВЧ- и комбинированную (ИК + СВЧ) сушки [1].

Обзор литературы

В настоящее время ИК-излучение широко используется для сушки растительного сырья. Многие авторы указывают на преимущества и недостатки использования ИК-сушки [2–6]. Преимуществами ИК-сушки пищевых продуктов являются сокращение времени сушки, универсальность ИК-нагрева, простота необходимого оборудования, легкое расположение ИК-нагревателей в конвективных, контактных и микроволновых сушилках, короткие переходные процессы, высокая эффективность преобразования электрической энергии в тепло, проникновение излучения непосредственно в изделие, без нагрева при этом окружающей среды, меньшая стоимость источников ИК-излучения по сравнению с диэлектрическими и микроволновыми источниками, длительный срок службы и низкие эксплуатационные расходы.

Ввиду ряда обозначенных преимуществ ИК-сушка в сочетании с конвективной или вакуумной становится все более популярной. Известно исследование, которое показало улучшение качества сушеного картофеля, повышение тепловой эффективности процесса сушки и снижение энергозатрат на получение готового продукта за счет использования ступенчатого режима радиационно-конвективной сушки [7–10]. Исследователи отмечают высокую пищевую ценность полученных картофельных чипсов, что обусловлено высокой сохранностью ценных термолабильных веществ из-за применения «мягких» температурных режимов сушки и высокой интенсивностью влагоудаления. Сушку картофельных чипсов в ИК-диапазоне исследовали также Т. М. Афзал и Т. Абэ [11].

Интенсивность излучения составляла от 0,125 до 0,500 Вт/см². Они заметили, что скорость сушки возрастала с увеличением толщины слоя из-за более низкой энергии активации для десорбции влаги. Позже они продемонстрировали, что сушка картофеля с помощью ИК-излучения – это процесс с падающей скоростью, и скорость сушки зависит от уровня интенсивности излучения [12; 13].

Прерывистая (пространственная или временная) подача инфракрасного излучения потенциально способна сберечь энергию, снизить потребление воздуха в конвективных сушилках и повысить качество термочувствительных продуктов [14; 15]. И. В. Григорьев, С. П. Рудобашта и В. Д. Очиров показали, что при использовании импульсного ИК-облучения и при обеспечении на облучаемом объекте высоких значений энергетической освещенности необходимый для достижения предельной температуры промежуток времени существенно короче, чем при обычных режимах постепенного непрерывного облучения, и при этом объекты с высокой удельной теплоемкостью нагреваются быстрее [16]. В исследованиях [17; 18] отмечается необходимость учитывать спектральные характеристики излучателя и облучаемого сырья при определении параметров импульсного ИК-нагрева. И. В. Алтухов [19] показал, что благодаря высокой проникающей способности ИК-излучения определенной мощности с соответствующей длиной волны органические и биоорганические молекулы диссоциируют микроорганизмы, споры, грибки, а также разрушают и уничтожают вирусы. Данные особенности импульсного ИК-излучения позволяют получать продукты длительного хранения. Многочисленные исследования показали эффективность применения

импульсного ИК-излучения для получения продукции высокого качества при сушке сахаросодержащих корнеплодов и моркови [17; 19–21]¹. Благодаря применению «мягких» температурных режимов сушки и высокой интенсивности влагоудаления прерывистая радиационно-конвективная сушка позволяет получить такие продукты, как грушевые чипсы, персиковые чипсы и чипсы из хурмы [22]. Исследователи отмечают их высокую пищевую ценность [23–26].

Чтобы полностью использовать потенциал технологий ИК-сушки, необходимо провести много фундаментальных и промышленных исследований и разработок. Проведенные ранее исследования позволяют моделировать процесс в период постоянной скорости сушки [27; 28]. Для учета специфики возрастания скорости при прогреве такого материала, как слайсы моркови, и падения скорости во втором периоде сушки необходимо провести дополнительные исследования.

Материалы и методы

Характеристика объектов сушки

Для исследования кинетики процесса сушки в ленточной сушилке были использованы образцы свежей, недавно собранной моркови, которая не имела признаков загнивания или порчи. Образцы подбирались хорошего качества, без повреждений, трещин или пятен. Для проведения исследования морковь нарезалась слайсами одинакового размера толщиной 1 и 3 мм. Среднее влажностное содержание образцов моркови было $(5,60 \pm 0,35)$ кг, что соответствовало начальной влажности 84–86 %.

Описание экспериментального стенда для сушки в движущемся слое

Установка представляет собой ленточный транспортер (рис. 1), на котором размещены ИК-модули и камеры с вентиляторами, позволяющие при

¹ Алтухов И. В., Очиров В. Д. Технология инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеплодов // Engineering problems in agriculture and industry : материалы Междунар. конф. Улан-Батор, 2010. С. 87–92.

необходимости подключать СВЧ-модуль. Камера решает задачи отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК-обработки содержит два кварцевых ИК-излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Мощность излучателей регулируется тиристорными регуляторами напряжения в диапазоне от 0 до 1100 Вт.

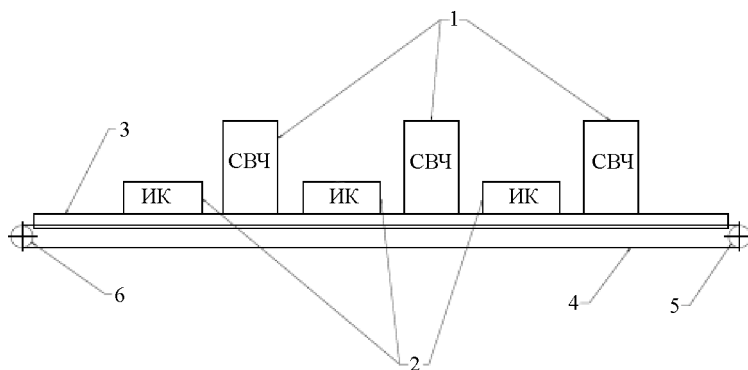
Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6 – 90 W, с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость движения ленты в широком диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Задачами экспериментальной установки было провести испытания для определения зависимостей, которые

характеризовали бы кинетику процесса удаления влаги в подвижном слое растительного сырья.

Методика определения влажности исходного сырья

Влажность исходного продукта определялась методом высушивания до постоянной массы при температуре 80 °С. В предварительно высушенный бюкс с известной массой помещалось 5 г продукта. Время высушивания составляло около 10–15 ч. После этого бюкс помещался в эксикатор для охлаждения на 30 мин, по истечению которых проводилось взвешивание на аналитических весах Radwag AS 220/С с точностью $\pm 0,0004$ г. Затем бюкс вновь помещался в сушильный шкаф на 1–1,5 ч, после чего операция повторялась.



Р и с. 1. Экспериментальная опытно-промышленная ленточная сушилка: 1 – камеры; 2 – ИК-модули; 3 – транспортный канал; 4 – лента; 5 – приводной барабан; 6 – натяжной барабан

F i g. 1. Experimental pilot belt dryer: 1 – cameras; 2 – IR modules; 3 – transport channel; 4 – belt; 5 – drive drum; 6 – tension drum

Данные манипуляции проводились до тех пор, пока разница между показаниями массы бюксы не превышала 0,0005 г. Таким образом определялась масса сухих веществ в образце, что позволяло определить влажность и влагосодержание образца.

Методика определения скорости движения ленты

В движение лента приводится низкооборотным двигателем, регулирование производительности которого осуществляется посредством многооборотного потенциометра. Таким образом, представляется возможность организовать несколько режимов скоростей ленты в диапазоне 0,5...35 мм/с.

Измерение скорости движения ленты проводится следующим образом. Параллельно ленте на вращающиеся барабаны натягивается нить, к которой крепится флажок. В таком случае нить движется с той же скоростью, что и лента. Заведомо зная геометрические данные сушильной установки, с помощью секундомера фиксируется время прохождения флажка определенного расстояния. При длине нити (6000 ± 3) мм на максимальной скорости время прохождения флажком полного круга составляет (171,4 ± 0,5) с. Погрешность определения скорости составит ±0,12 мм/с или 0,3 %.

Определение относительного влагосодержания и модели кинетики процесса

Относительное влагосодержание определяется как отношение разности текущего и равновесного влагосодержания к разности начального и равновесного влагосодержания. Как указано во многих работах [29–33] для овощного сырья равновесное влагосодержание является пренебрежимо малым по сравнению с текущим и тем более начальным влагосодержанием. Тогда относительное влагосодержание может быть определено как отношение текущего влагосодержания к начальному или как отношение текущей массы влаги

в продукте к начальной. Текущая масса влаги в продукте определялась при помощи взвешивания на весах как разница между начальной массой влаги в образце и убылью массы продукта в течение процесса.

В литературе [32; 34; 35] имеется множество эмпирических моделей кинетики процесса сушки основанных на определении зависимости относительного влагосодержания от времени процесса сушки. Из них наиболее простую форму имеют модели:

$$\begin{aligned} \text{Ньютона } w^c / w_0^c &= e^{-k \cdot t}, \\ \text{Хендерсона } w^c / w_0^c &= a \cdot e^{-k \cdot t}, \\ \text{Пэйджа } w^c / w_0^c &= e^{-k \cdot t^n}, \end{aligned}$$

и логарифмическая модель $w^c / w_0^c = a \cdot e^{-k \cdot t} + c$,

где w^c – текущее влагосодержание, w_0^c – начальное влагосодержание, t – время процесса, k, a, c – эмпирические коэффициенты.

Неизвестные эмпирические коэффициенты находятся с использованием метода наименьших квадратов, применяя методы линеаризации и стандартные функции программы Mathcad.

Определение эффективного коэффициента диффузии и энергии активации

Эффективный коэффициент диффузии может быть получен с использованием имеющихся решений уравнения нестационарной диффузии, известного как 2-й закон Фика, для бесконечной пластины [30–34].

$$D_{eff} = \frac{4 \cdot L^2}{\pi^2} \cdot slope(t, \ln(w^c / w_0^c))$$

где $slope(x, y)$ – функция определения углового коэффициента линейной зависимости $y = f(x)$.

Энергия активации E_a может быть найдена из известной формулы Аррениуса

$$D_{eff} = D_0 \cdot e^{-\frac{E_a \cdot m}{P}}, \quad (1)$$

где m – масса образца, кг; P – мощность излучения, Вт; D_0 – числовой коэффициент, m^2/c .

Тогда

$$E_a = -\text{slope}(m/P, \ln(D_{\text{eff}})).$$

Результаты исследования

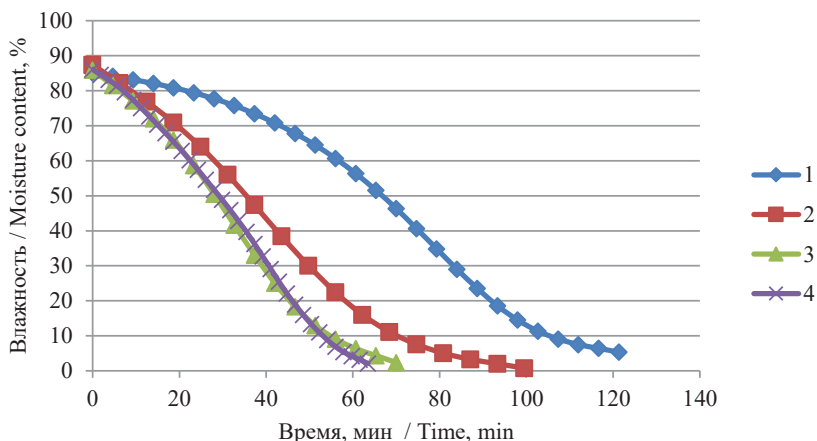
Ранее проведенные исследования инфракрасной сушки плодов и овощей в неподвижном слое [27; 35; 36] показали существенное влияние мощности излучения и толщины слоя на кинетику процесса сушки. В случае использования ленточной сушилки для организации непрерывного процесса инфракрасной сушки еще одним параметром, влияние которого на кинетику процесса было исследовано, является скорость ленты (рис. 2).

Для определения этого влияния опыты проводили при средней интенсивности излучения в камерах равной $2,25 \text{ кВт/м}^2$ и толщине слоя 3 мм. В процессе сушки происходило снижение влажности от начальной 85 % до нормативной 8 % за 55 мин при скорости ленты до 10 мм/с. Рост скорости ленты до 15 мм/с приводит к увеличению времени

сушки до 70 мин, а при скорости ленты 20 мм/с время сушки составит 105 мин. Видимо, это связано с тем, что при скорости ленты выше 10 мм/с ее скорость становится слишком большой и продукт может не успеть получить необходимое количество тепла для испарения влаги, что приводит к увеличению времени сушки. При более высоких скоростях ленты может происходить снижение температуры продукта в результате его быстрого перемещения через зону инфракрасного излучения, что также может увеличить время сушки.

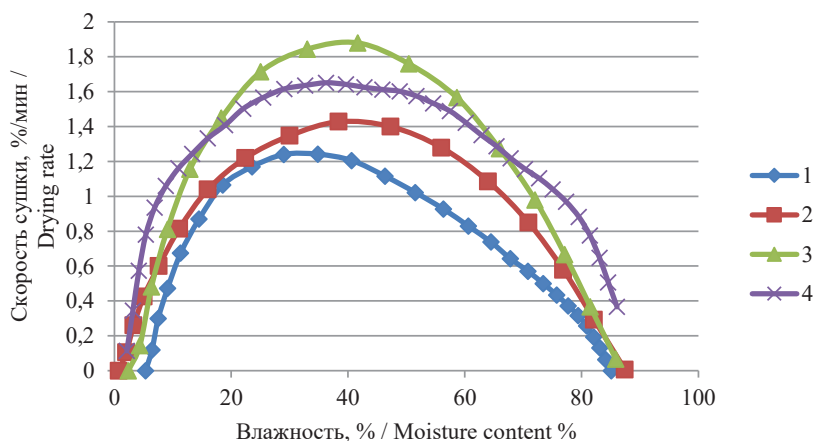
При скорости ленты ниже 10 мм/с наблюдаемые кривые сушки идентичны кривым, полученным при сушке слайсов моркови в неподвижном слое [27; 36; 37]. Высказанное выше предположение о причинах снижения скорости сушки при увеличении скорости ленты выше 10 мм/с косвенно подтверждается характером кривых скорости сушки (рис. 3).

Так, при скорости ленты 20 мм/с на кривой отчетливо наблюдается длительный период, при котором происходит нарастание скорости сушки до максимума за счет медленного прогрева материала.



Р и с. 2. Кривые сушки моркови на ленте: 1 – скорость ленты 20 мм/с; 2 – скорость ленты 15 мм/с; 3 – скорость ленты 10 мм/с; 4 – скорость ленты 5 мм/с

F i g. 2. Carrot drying curves: 1 – belt speed 20 mm/s; 2 – belt speed 15 mm/s; 3 – belt speed 10 mm/s; 4 – belt speed 5 mm/s



Р и с. 3. Кривые скорости сушки моркови на ленте: 1 – скорость ленты 20 мм/с; 2 – скорость ленты 15 мм/с; 3 – скорость ленты 10 мм/с; 4 – скорость ленты 5 мм/с
 F i g. 3. Curves of drying carrots on the belt: 1 – belt speed 20 mm/s; 2 – belt speed 15 mm/s; 3 – belt speed 10 mm/s; 4 – belt speed 5 mm/s

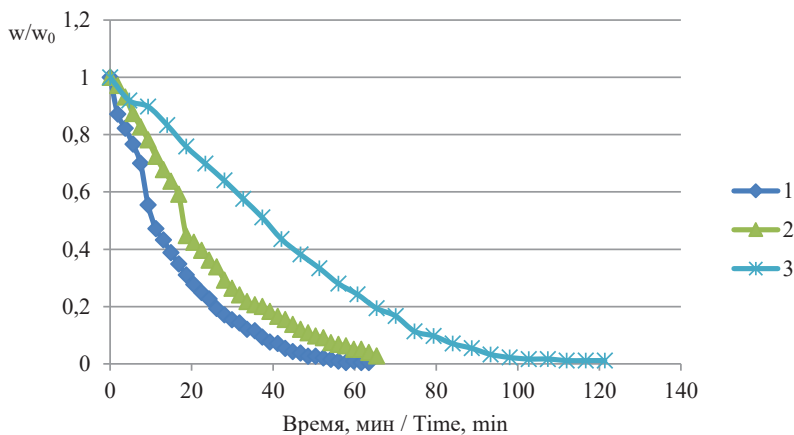
С уменьшением скорости ленты до 10 мм/с происходит увеличение максимальной скорости сушки, причем максимум достигается раньше, при более высоких значениях влажности. Дальнейшее уменьшение скорости ленты приводит к снижению максимальной скорости сушки, а характер кривой 4 (рис. 3) близок к виду классической кривой скорости сушки с выраженным периодом почти постоянной скорости сушки при влажности от 60 до 25 %, в котором скорость сушки находится в пределах $1,4 \pm 0,1$ %/мин.

Такое изменение характера влияния скорости ленты, по-видимому, связано с тем, что увеличение скорости ленты от 0 мм/с до 10 мм/с может приводить к более эффективному удалению влаги из зоны воздействия инфракрасного излучения, так как продукт будет быстрее перемещаться из зоны высокой влажности в зону более сухого воздуха. Это повлияет на ускорение процесса сушки и сокращение времени, необходимого для высушивания продукта. Увеличение скорости ленты в этом диапазоне способно привести к более эффективному массообмену между продуктом и воздухом, что может

ускорить процесс сушки. Кроме того, это может привести к более равномерной температуре и влажности продукта, что также повлияет на ускорение процесса сушки. Таким образом, оптимальное значение скорости ленты находится в диапазоне от 5 до 15 мм/с, и дальнейшие опыты были проведены на скорости ленты 10 мм/с.

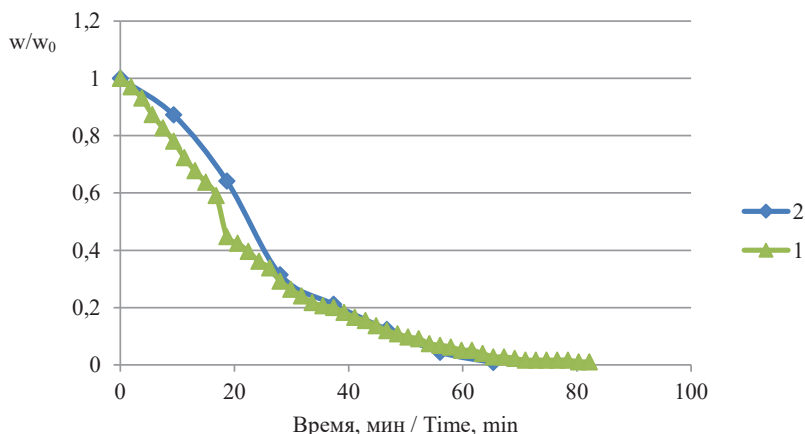
Так как режим сушки в ленточной сушилке отличается от непрерывного режима сушки в неподвижном слое, исследованного ранее [36–38], то было оценено влияние мощности ИК-излучения и толщины слоя на кинетику процесса (рис. 4 и 5). Так как при ИК-сушке слайсов моркови в данной установке практически не наблюдалось постоянной скорости сушки при выбранном значении скорости ленты, то для уточненного расчета продолжительности процесса сушки рассмотрено влияние этих параметров на безразмерное влагосодержание.

Как видно (рис. 5), при толщине слоя до 3 мм при сушке слайсов моркови в ленточной сушилке ее влиянием можно пренебречь, и ключевым фактором, влияющим на продолжительность процесса сушки, остается мощность ИК-излучения (рис. 4).



Р и с. 4. Кривые изменения безразмерного влагосодержания при мощности излучателей: 1 – 450Вт; 2 – 300Вт; 3 – 170Вт

Fig. 4. Curves of changes in water content ratio (MR) at emitter power: 1 – 450W; 2 – 300W; 3 – 170W



Р и с. 5. Кривые изменения безразмерного влагосодержания при толщине слоя: 1 – 3 мм; 2 – 1 мм

Fig. 5. Curves of changes in dimensionless water content ratio (MR) at layer thickness: 1 – 3 mm; 2 – 1 mm

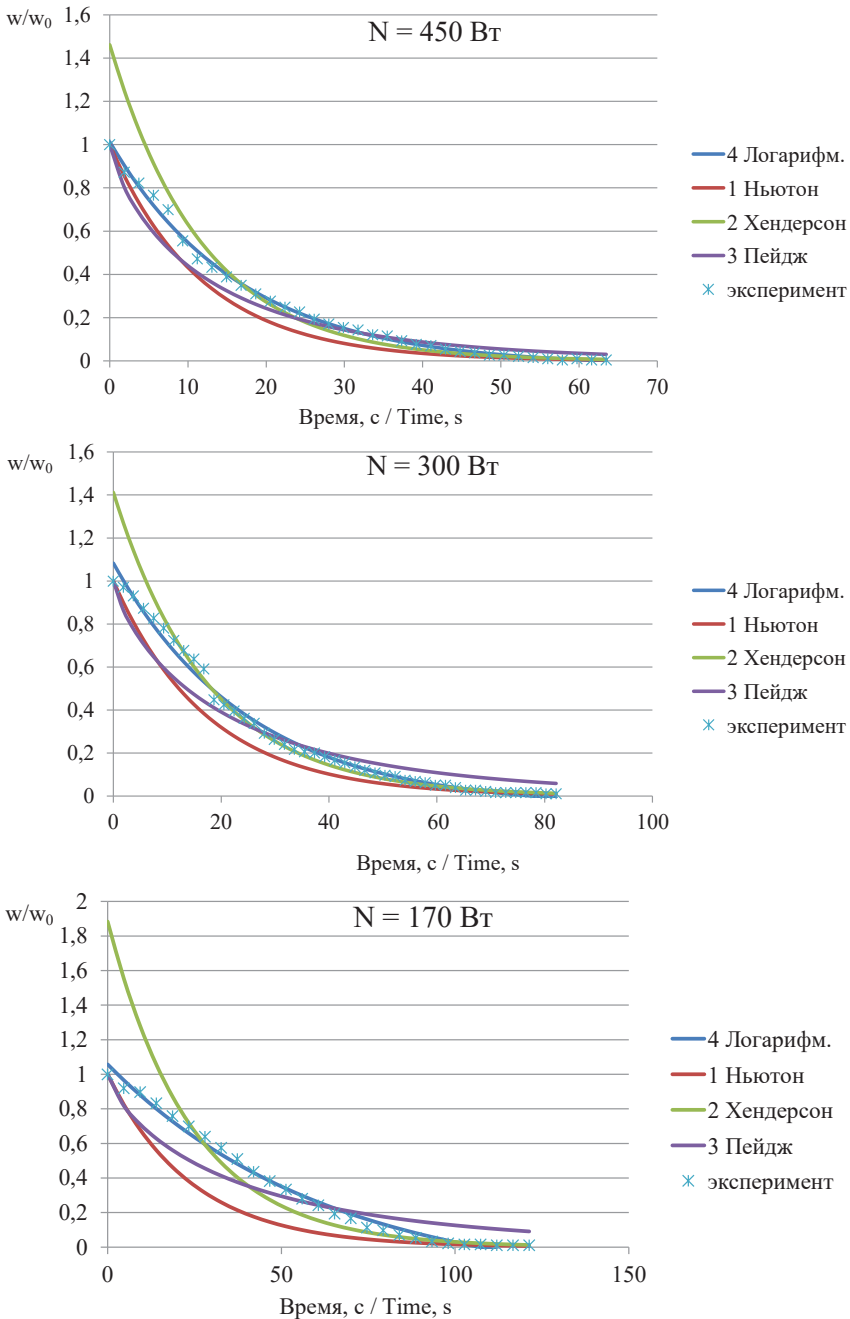
Для определения возможности практического применения в системах расчета и проектирования данного типа установок были проанализированы известные теоретические модели.

Модель Ньютона совпадает с экспериментальными данными только в крайних точках и расхождение модели с экспериментом растет с уменьшением подводимой мощности. Так, среднеквадратическое отклонение для 450 Вт составляет 0,072, для 300 Вт – 0,095 и 0,18 – для 170 Вт.

Electrical technologies and equipment

Модель Хендерсона удовлетворительно описывает экспериментальные данные спустя 1000 с после начала процесса для 450 и 300 Вт мощности излучателей. Однако для 170 Вт среднеквадратическое отклонение составит 0,234 и эти отклонения можно наблюдать визуально (рис. 6).

Модель Пейджа для всего диапазона мощностей характеризуется заниженными значениями безразмерного относительного влагосодержания в начале процесса сушки и завышенными значениями – в конце.



Р и с. 6. Сравнение различных моделей с экспериментальными данными: 1 – модель Ньютона; 2 – модель Хендерсона; 3 – модель Пейджа; 4 – логарифмическая модель; * – экспериментальные данные

Fig. 6. Comparison of various models with experimental data: 1 – Newton model; 2 – Henderson model; 3 – Page model; 4 – logarithmic model; * – experimental data

Среднеквадратичное отклонение находится в диапазоне 0,061–0,115. Наилучшее совпадение достигается для логарифмической модели. Значения среднеквадратичных отклонений приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов логарифмической модели для различных значений мощности излучателей. Процедура интерполяции позволяет использовать эти данные для определения времени процесса сушки слайсов моркови в ленточной ИК-сушилке до заданной влажности в диапазоне мощностей излучателей от 170 до 450 Вт.

Коэффициент диффузии ($Deff$)

Ключевым показателем, характеризующим скорость сушки во втором периоде, является эффективный коэффициент диффузии. Значения $Deff$ в сушилке лежат в пределах от 10^{-8} до 10^{-10} м²/с для фруктов и овощей [39–41]. Значения $Deff$ при различных условиях сушки слайсов моркови, полученные

по уравнению (1), и расчетные значения показаны в таблице 3. Средние значения эффективных коэффициентов диффузии лежат в диапазоне $3 \cdot 10^{-10}$ – $8,14 \cdot 10^{-10}$ м²/с, что согласуется с данными [29], согласно которым для моркови $Deff = 2,01 \times 10^{-10}$ – $12,10 \times 10^{-10}$.

Значения $Deff$ увеличивались с ростом мощности ИК-излучения ввиду более высоких температур образца. Текущие значения $Deff$ в процессе сушки для различной мощности ИК-излучения могут быть рассчитаны по уравнению (1), используя полученные значения энергии активации.

Обсуждение и заключение

Характер кинетики процесса сушки моркови в рассмотренной ленточной ИК-сушилке имеет принципиальные отличия от кинетики процесса сушки в неподвижном слое. В связи с конструктивными особенностями сушилки наблюдается экстремальный характер влияния скорости ленты на скорость сушки.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Расчетные модели Calculation models

Модель / Model	Среднеквадратичное отклонение / RMSE		
	Мощность, Вт / Power, W		
	170	300	450
Ньютона / Newton	0,072	0,095	0,180
Хендерсона / Henderson	0,118	0,088	0,234
Пейджа / Page	0,061	0,083	0,115
Логарифмическая / Logarithmic	0,033	0,027	0,017

Т а б л и ц а 2

Table 2

Значения коэффициентов логарифмической модели Values of the coefficients of the logarithmic model

Коэффициент / Coefficient	Значения коэффициентов / Values of the coefficients		
	Мощность, Вт / Power, W		
	170	300	450
a	1,037	1,135	1,298
k	$0,99 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$
c	-0,024	-0,052	-0,24

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3Значения коэффициентов логарифмической модели
Values of the diffusion coefficients of the logarithmic model

Коэффициент / Coefficient	Значения коэффициентов / Values of the coefficients		
	Мощность, Вт / Power, W		
	450	300	170
Средний эффективный коэффициент диффузии $D_{eff} \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$ / Average effective diffusion coefficient $D_{eff} \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$	8,14	5,28	3,03
Энергия активации E_a , кВт/кг / Activation energy E_a , kW/kg	21,20	14,50	11,30
$D_0 \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	1,29	1,06	0,08

Если вначале с ростом скорости ленты происходит увеличение скорости сушки, то после достижения скоростью ленты значения в 10 мм/с наблюдается обратная зависимость. Кривые сушки имеют зону возрастающей скорости сушки, связанную с прогревом материала, и с увеличением скорости ленты, максимум на кривой скорости сушки смещается в сторону меньших влагосодержаний. Такой характер зависимостей делает неприменимыми имеющиеся зависимости для расчета процесса ИК-сушки моркови при постоянной скорости сушки. Из рассмотренных наиболее употребительных моделей описания процесса наилучшая корреляция с экспериментальными данными наблюдалась

у логарифмической модели, которую предлагается использовать для расчета продолжительности времени сушки при заданных параметрах мощности ИК-излучателей. Полученные значения эффективных коэффициентов диффузии согласуются с данными других исследователей. Целесообразно получить аналогичные данные для определения рациональных параметров процесса сушки схожего плодово-овощного сырья. Также представляется перспективным исследовать комбинированное влияние ИК- и СВЧ-излучения на кинетику и энергетику процесса сушки для определения оптимального соотношения мощностей и времени воздействия ИК- и СВЧ-излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems / O. G. Burdo [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2021. Vol. 57, Issue 3. P. 330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
2. Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F. G. A Review of Drying Methods for Improving the Quality of Dried Herbs // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. Vol. 61, Issue 11. P. 1763–1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>
3. Boateng I. D., Yang X. M., Li Y. Y. Optimization of Infrared-Drying Parameters for Ginkgo Biloba L. Seed and Evaluation of Product Quality and Bioactivity // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 160. Article no. 113108. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113108>
4. Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances / P. Sakare [et al.] // Food Engineering Reviews. 2020. Vol. 12, Issue 3. P. 381–398. <https://doi.org/10.1007/S12393-020-09237-W>

5. Mohammadi Z., Kashaninejad M., Ziaifar A. M. Peeling of Kiwifruit Using Infrared Heating Technology: A Feasibility and Optimization Study // LWT. 2019. Vol. 99. P. 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.037>
6. Омаров М. М., Исламов М. Н., Абду З. А. Сушка моркови с использованием инфракрасных излучателей СФ-4 // Пищевая промышленность. 2009. № 8. С. 18–19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sushka-morkovi-s-ispolzovaniem-infrakrasnyh-izluchateley-sf-4> (дата обращения: 30.03.2023).
7. Drying Kinetics of Food Materials in Infrared Radiation Drying: A Review / D. S. Delfiya [et al.] // Journal of Food Process Engineering. 2022. Vol. 45, Issue 6. Article no. e13810. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13810>
8. Желтоухова Е. Ю., Каданцев А. А., Яницкий В. И. Исследование радиационно-конвективной сушки картофеля при переменном теплоподводе // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 1. С. 46–49. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-kartofelya-pri-priemennom-teplopodvode/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).
9. The Effectiveness of Combined Infrared and Hot-Air Drying Strategies for Sweet Potato. D. I. Onwude [et al.] // Journal of Food Engineering. 2019. Vol. 241. P. 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008>
10. Modelling the Mid-infrared Drying of Sweet Potato: Kinetics, Mass and Heat Transfer Parameters, and Energy Consumption / D. I. Onwude [et al.] // Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung. 2018. Vol. 54. P. 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/S00231-018-2338-Y>
11. Afzal T. M., Abe T. Diffusion in Potato During Far Infrared Radiation Drying // Journal of Food Engineering. 1998. Vol. 37, Issue 4. P. 353–365. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877498001113?via%3Dihub> (дата обращения: 16.04.2023).
12. Afzal T. M., Abe T. Some Fundamental Attributes of Far Infrared Radiation Drying of Potato // Drying Technology. 1999. Vol. 17, Issue 1/2. P. 138–155. <https://doi.org/10.1080/07373939908917522>
13. Afzal T. M., Abe T., Hikida Y. Energy and Quality Aspects During Combined FIR–Convection Drying of Barley // Journal of Food Engineering. 1999. Vol. 42, Issue 4. P. 177–182. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00117-X)
14. Study of Interval Infrared Airflow Drying: A Case Study of Butternut (Cucurbita Moschata). C. Rezik [et al.] // LWT, 2021. Vol. 147. Article no. 111486. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111486>
15. Мелякова О. А. Энергоэффективные режимы сушки овощей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 4 (84). С. 169–172. URL: <https://global5.com/Zhurnaly/Ekonomika-i-menedzhment/Izvestiya-Orenburgskogo-GAU/vypusk-2020-4?article=282539> (дата обращения: 16.04.2023).
16. Григорьев И. В., Рудобашта С. П. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ «Агроинженерия». 2009. № 4 (35). С. 7–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/impulsnaya-infrakrasnaya-sushka-semyan-ovoschnyh-kultur> (дата обращения: 24.08.2023).
17. Алтухов И. В. Применение дискретного ИК-энергоподвода в технологии сушки сахаросодержащих корнеплодов // Вестник ИрГСХА. 2013. № 55. С. 100–105. URL: <http://vestnik.irsau.ru/files/v55.pdf> (дата обращения: 24.08.2023).
18. Алтухов И. В., Цугленок Н. В. Особенности работы импульсных ИК-излучателей в технологии сушки корнеклубнеплодов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 4 (126). 2015. С. 109–114. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-raboty-impulsnyh-ik-izluchateley-v-tehnologii-sushki-korneklubneplodov/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).
19. Алтухов И. В., Цугленок Н. В., Очиров В. Д. Влияние импульсной инфракрасной сушки на сохранность активно действующих веществ // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 1. С. 7–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-impulsnoy-infrakrasnoy-sushki-na-sohrannost-aktivnodeystvyuschih-veschestv/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).
20. Алтухов И. В. Обоснование режимов сушки сахаросодержащих корнеплодов ИК-излучением // Вестник ИрГСХА. 2013. № 56. С. 87–97. URL: <http://vestnik.irsau.ru/files/v56.pdf> (дата обращения: 16.04.2023).
21. Остриков А. Н., Желтоухова Е. Ю. Радиационно-конвективная сушка грушевых чипсов при импульсном энергоподводе // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 1. С. 83–86.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionno-konvektivnaya-sushka-grushevyyh-chipsov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).

22. Остриков А. Н., Желтоухова Е. Ю. Изучение кинетики радиационно-конвективной сушки персиков при импульсном энергоподводе // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2014. № 1. С. 114–118. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-kinetiki-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-persikov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).

23. Effects of Catalytic Infrared Drying in Combination with Hot air Drying and Freeze Drying on the Drying Characteristics and Product Quality of Chives / C. Gu [et al.] // LWT. 2022. Vol. 161. Article no. 113363. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113363>

24. Effect of Hot Air and Infrared Drying on the Retention of Cannabidiol and Terpenes in Industrial Hemp (*Cannabis Sativa L.*) / C. Chen [et al.] // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 172. Article no. 114051. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114051>

25. EL-Mesery H. S., Kamel R. M., Emara R. Z. Influence of Infrared Intensity and Air Temperature on Energy Consumption and Physical Quality of Dried Apple Using Hybrid Dryer // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 27. Article no. 101365. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101365>

26. Drying of Green Bell Pepper Slices Using an IR-assisted Spouted Bed Dryer: An Assessment of Drying Kinetics and Energy Consumption / M. Moradi [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 60. Article no. 102280. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.102280>

27. 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. Vol. 5, no. 11. P. 24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>

28. Characteristics and Multi-objective Optimization of Carrot Dehydration in a Hybrid Infrared / Z. Geng [et al.] // LWT. 2022. Vol. 172. Article no. 114229. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114229>

29. Hybrid Microwave-hot Air Drying of the Osmotically Treated Carrots / A. U. Souza [et al.] // LWT. 2022. Vol. 156. Article no. 113046. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113046>

30. Drying Kinetics of Paddy Drying with Graphene Far-infrared Drying Equipment at Different IR Temperatures, Radiations-distances, Grain-flow, and Dehumidifying-velocities / Y. Du [et al.] // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 43. Article no. 102780. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.102780>

31. Arslan A., Soysal Y., Keskin M. Mathematical Modeling, Moisture Diffusion and Color Quality in Intermittent Microwave Drying of Organic and Conventional Sweet Red Peppers // AgriEngineering. 2020. Vol. 2, Issue 3. P. 393–407. <https://doi.org/10.3390/AGRIENGINEERING2030027>

32. Selvi K. Ç. Investigating the Influence of Infrared Drying Method on Linden (*Tilia Platyphyllos scop.*) leaves: Kinetics, Color, Projected Area, Modeling, Total Phenolic, and Flavonoid Content // Plants. 2020. Vol. 9, Issue 7. Article no. 916. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9070916>

33. Mathematical Modelling of Far-infrared Vacuum Drying of Apple Slices / V. Mitrevski [et al.] // Thermal Science. 2019. Vol. 23. P. 393–400. <https://doi.org/10.2298/TSCI180205143M>

34. Doymaz I., Kipcak As., Piskin S. Microwave Drying of Green Bean Slices: Drying Kinetics and Physical Quality // Czech J. Food Sci. 2015. Vol. 33, Issue 4. P. 367–376. <https://doi.org/10.17221/566/2014-CJFS>

35. Minaei S., Motevali A., Ahmadi E. Mathematical Models of Drying Pomegranate Arils in Vacuum and Microwave Dryers // Journal of Agricultural Science and Technology. 2012. Vol. 14. P. 311–325.

36. Гаврилов А. В. Анализ современных энерготехнологий переработки растительного сырья // Агроинженерия. 2019. № 5 (93). С. 31–39. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>

37. Система инновационных энерготехнологий обезвоживания пищевого сырья / О. Бурдо [и др.] // Problemele Energeticii Regionale. 2020. Vol. 2 (46). P. 92–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/zenodo.3898317>

38. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems / O. G. Burdo [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2021. Vol. 57, Issue 3. P. 330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>

39. Salehi F., Satorabi M. Influence of Infrared Drying on Drying Kinetics of Apple Slices Coated with Basil Seed and Xanthan Gums // *International Journal of Fruit Science*. 2021. Vol. 21, Issue 1. P. 519–527. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>
40. Evaluation of Exergy Performance and Onion Drying Properties in a Multi-stage Semi-industrial Continuous Dryer: Artificial Neural Networks (ANNs) and ANFIS models / M. Kaveh [et al.] // *Food and Bioproducts Processing*. 2021. Vol. 127. P. 58–76. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2021.02.010>
41. Batista A. S., Souza M. F. F., Prado M. M. Moisture Diffusion in Passion Fruit Seeds under Infrared Drying // *Diffusion Foundations and Materials Applications*. 2022. Vol. 30. P. 25–32. <https://doi.org/10.4028/P-W52H5B>

Поступила 18.04.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023; принята к публикации 30.06.2023.

Об авторах:

Гаврилов Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, пос. Аграрное), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: [AAH-5137-2019](https://orcid.org/0000-0003-3382-0307), tehfac@mail.ru

Гербер Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по учебной работе, профессор кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета 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. Burdo O.G., Trishyn F.A., Sirotiyuk I.V., Kruss S. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(3):330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
2. Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F.G. A Review of Drying Methods for Improving the Quality of Dried Herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021;61(11):1763–1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>
3. Boateng I.D., Yang X.M., Li Y.Y. Optimization of Infrared-Drying Parameters for Ginkgo Biloba L. Seed and Evaluation of Product Quality and Bioactivity. *Industrial Crops and Products*. 2021;160:113108. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113108>
4. Sakare P., Prasad N., Thombare N., Singh R. Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances. *Food Engineering Reviews*. 2020;12(3):381–398. <https://doi.org/10.1007/S12393-020-09237-W>
5. Mohammadi Z., Kashaninejad M., Ziaifar A.M., Ghorbani M. Peeling of Kiwifruit Using Infrared Heating Technology: A Feasibility and Optimization Study. *LWT*. 2019;99:128–137. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.037>
6. Omarov M.M., Islamov M.N., Abdu Z.A. [Drying Carrots Using Infrared Emitters SF-4]. *Pishchevaya promyshlennost*. 2009;(8):18–19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sushka-morkovi-s-ispolzovaniem-infrakrasnyh-izluchateley-sf-4> (accessed 30.03.2023). (In Russ.)

7. Aniesrani Delfiya D.S., Prashob K., Murali S., Alifiya P.V., Samuel M.P., Pandiselvam R. Drying Kinetics of Food Materials in Infrared Radiation Drying: A Review. *Journal of Food Process Engineering*. 2022;45(6):e13810. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13810>
8. Zheltoukhova E.Yu., Kadantsev A.A., Yanitsky V.I. [Study of Radiative-Convective Drying of Potatoes with Variable Heat Supply]. *Vestnik VGUIT*. 2017;79(1):46–49. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-kartofelya-pri-peremennom-teplopodvode/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
9. Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R. The Effectiveness of Combined Infrared and Hot-Air Drying Strategies for Sweet Potato. *Journal of Food Engineering*. 2019;241:75–87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008>
10. Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R., Ghen G. Modelling the Mid-Infrared Drying of Sweet Potato: Kinetics, Mass and Heat Transfer Parameters, and Energy Consumption. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*. 2018;54:2917–2933. <https://doi.org/10.1007/S00231-018-2338-Y>
11. Afzal T.M., Abe T. Diffusion in Potato during Far Infrared Radiation Drying. *Journal of Food Engineering*. 1998;37(4):353–365. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877498001113?via%3Dihub> (accessed 16.04.2023).
12. Afzal T.M., Abe T. Some Fundamental Attributes of Far Infrared Radiation Drying of Potato. *Drying Technology*. 1999;17(1/2):138–155. <https://doi.org/10.1080/07373939908917522>
13. Afzal T.M., Abe T., Hikida Y. Energy and Quality Aspects during Combined FIR–Convection Drying of Barley. *Journal of Food Engineering*. 1999;42(4):177–182. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00117-X)
14. Rekik C., Besombes C., Hajji W., Gliguem H., Bellagha S., Mujumdar A.S., et al. Study of Interval Infrared Airflow Drying: A Case Study of Butternut (Cucurbita Moschata). *LWT*. 2021;147:111486. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111486>
15. Melyakova O.A. Energy Efficient Modes of Drying Vegetables. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(4):169–172. Available at: <https://globalf5.com/Zhurnaly/Ekonomika-i-menedzhment/Izvestiya-Orenburgskogo-GAU/vypusk-2020-4?article=282539> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
16. Grigoriev I.V., Rudobashta S.P. Pulse Infrared Drying of Seeds of Vegetable Crops. *Vestnik FGOU VPO MGAU "Agroinzheneriya"*. 2009;(4):7–10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/impulsnaya-infrakrasnaya-sushka-semyan-ovoschnyh-kultur> (accessed 24.08.2023). (In Russ.)
17. Altukhov I.V. The Use of Discrete IR Energy Supply in the Technology of Drying Sugar-Containing Root Crops. *Vestnik IrGSKhA*. 2013;(55):100–105. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v55.pdf> (accessed 24.08.2023). (In Russ.)
18. Altukhov I.V., Zuglenok N.V. Features of the Operation of Pulsed IR Emitters in the Technology of Drying Root Crops. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015;(4):109–114. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-raboty-impulсных-ik-izluchateley-v-tehnologii-sushki-korneklubnoplodov/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
19. Altukhov I.V., Tsuglenok N.V., Ochirov V.D. Influence of Pulsed Infrared Drying on the Safety of Active Substances. *Vestnik APK Stavropolia*. 2015;(1):7–10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-impulsnoy-infrakrasnoy-sushki-na-sohrannost-aktivnodeystvuyuschih-veschestv/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
20. Altukhov I.V. Substantiation of Modes of Drying Sugar-Containing Root Crops by IR Radiation. *Vestnik IrGShA*. 2013;(56):87–97. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v56.pdf> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
21. Ostrikov A.N., Zheltoukhova E.Yu. Radiation-convective drying of Pear Chips with Pulsed Energy Supply. *Izvestiya Vuzov. Pishchevaya Tekhnologiya*. 2012;(1):83–86. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionno-konvektivnaya-sushka-grushevyyh-chipsov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)

22. Ostrikov A.N., Zheltoukhova E.Yu. Study of the Kinetics of Radiation-Convective Drying of Peaches with Pulsed Energy Supply. *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*. 2014;(1):114–118. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-kinetiki-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-persikov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
23. Gu C., Ma H., Tuly J. A., Guo L., Zhang X., Liu D. Effects of Catalytic Infrared Drying in Combination with Hot Air Drying and Freeze Drying on the Drying Characteristics and Product Quality of Chives. *LWT*. 2022;161:113363. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113363>
24. Chen C., Wongso I., Putnam D., Khir R. Effect of Hot Air and Infrared Drying on the Retention of Cannabidiol and Terpenes in Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Industrial Crops and Products*. 2021;172:114051. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114051>
25. El-Mesery H.S., Kamel R.M., Emara R.Z. Influence of Infrared Intensity and Air Temperature on Energy Consumption and Physical Quality of Dried Apple Using Hybrid Dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;27:101365. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101365>
26. Moradi M., Azizi S., Niakousari M., Kamgar S. Drying of Green Bell Pepper Slices Using an Ir-Assisted Spouted Bed Dryer: An Assessment of Drying Kinetics and Energy Consumption. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;60:102280. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.102280>
27. Burdo O., Bezbah I., Kepin N., Zikov A., Yarovy I., Gavrilov A., et al. Drying of Green Bell Pepper Slices Using an Ir-Assisted Spouted Bed Dryer: An Assessment of Drying Kinetics and Energy Consumption. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019;5(11):24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
28. Zhihua G., Torki M., Kaveh M., Beigi M., Yang X. Characteristics and Multi-Objective Optimization of Carrot Dehydration in a Hybrid Infrared/Hot Air Dryer. *LWT*. 2022;172:114229. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114229>
29. De Souza A.U., Gomes Corrêa J.L., Tanikawa D.H., Abrahao F.R., Jesus Jungueira J.R., Jiménez E.C. Hybrid Microwave-Hot Air Drying of the Osmotically Treated Carrots. *LWT*. 2022;156:113046. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113046>
30. Du Y., Yan J., Wei H., Xie H., Wu Y., Zhou J. Drying Kinetics of Paddy Drying with Graphene Far-Infrared Drying Equipment at Different IR Temperatures, Radiations-Distances, Grain-Flow, and Dehumidifying-Velocities. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;43:102780. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.102780>
31. Arslan A., Soysal Y., Keskin M. Mathematical Modeling, Moisture Diffusion and Color Quality in Intermittent Microwave Drying of Organic and Conventional Sweet Red Peppers. *AgriEngineering*. 2020;2(3):393–407. <https://doi.org/10.3390/AGRIENGINEERING2030027>
32. Selvi K.Ç. Investigating the Influence of Infrared Drying Method on Linden (*Tilia platyphyllos* Scop.) Leaves: Kinetics, Color, Projected Area, Modeling, Total Phenolic, and Flavonoid Content. *Plants*. 2020;9(7):916. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9070916>
33. Mitrevski V., Dedinac A., Mitrevska C., Bundalevski S., Germitcioski T., Mijakovski V. Mathematical Modelling of Far-Infrared Vacuum Drying of Apple Slices. *Thermal Science*. 2019;23:393–400. <https://doi.org/10.2298/TSCI180205143M>
34. Doymaz I., Kipcak A.S., Piskin S. Microwave Drying of Green Bean Slices: Drying Kinetics and Physical Quality. *Czech J. Food Sci*. 2015;33(4):367–376. <https://doi.org/10.17221/566/2014-CJFS>
35. Minaei S., Motevali A., Ahmadi E., Aziz M.H. Mathematical Models of Drying Pomegranate Arils in Vacuum and Microwave Dryers. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012;14:311–325.
36. Gavrilov A.V. Analysis of Modern Energy Technologies for the Processing of Vegetable Raw Materials. *Agricultural Engineering*. 2019;(5):31–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>
37. Burdo O., Terziev S., Gavrilov A., Sirotiyuk I., Scherbich M. [System of Innovative Energy Technologies for Dehydration of Food Raw Materials]. *Problemele Energeticii Regionale*. 2020;2:92–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/zenodo.3898317>

38. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.B., Sirotyuk I.V. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(3):330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
39. Salehi F., Satorabi M. Influence of Infrared Drying on Drying Kinetics of Apple Slices Coated with Basil Seed and Xanthan Gums. *International Journal of Fruit Science*. 2021;21(1):519–527. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>
40. Kaveh M., Chayjan R.A., Golpour I., Poncet S., Seirafi F., Khezri B. Evaluation of Exergy Performance and Onion Drying Properties in a Multi-Stage Semi-Industrial Continuous Dryer: Artificial Neural Networks (Anns) and Anfis Models. *Food and Bioproducts Processing*. 2021;127:58–76. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2021.02.010>
41. Batista A.S., Souza M.F.F., Prado M.M. Moisture Diffusion in Passion Fruit Seeds under Infrared Drying. *Diffusion Foundations and Materials Applications*. 2022;30:25–32. <https://doi.org/10.4028/P-W52H5B>

Submitted 18.04.2023; revised 30.05.2023; accepted 30.06.2023.

About authors:

Alexander V. Gavrilov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Associate Professor of Chair of Technology and Equipment of Production and Processing of Products of Stock-Raising, Academy Agrotechnological of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agraroye, 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.), Professor, Deputy Director of Education, Professor of Chair of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, Academy Agrotechnological of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agraroye, 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, formulation of the purpose and objectives of the experiment, conducting the research.

Yu. B. Gerber – technical support for experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.



Результаты фотобиологических исследований по выращиванию салата под разномаспектральными источниками излучения

П. П. Долгих¹✉, С. В. Трепуз¹, В. А. Ханипова¹,
О. В. Сенкевич²

¹ Красноярский государственный аграрный университет
(г. Красноярск, Российская Федерация)

² Красноярский государственный медицинский университет
имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого Министерства
здравоохранения Российской Федерации
(г. Красноярск, Российская Федерация)

✉ dpp10@yandex.ru

Аннотация

Введение. При выращивании растений по технологиям вертикального земледелия важным фактором, регулирующим энергетические процессы, является электромагнитное излучение облучателей с определенными длинами волн в оптическом диапазоне.

Цель статьи. Обоснование технологии светодиодного облучения при выращивании зеленных культур в вегетационных установках в условиях излучения разномаспектрального состава, путем определения закономерностей изменения качественных показателей салата сортов Кук, Хризолит и Афицион, и создание на их основе концепции светодиодного облучателя для управляемого растениеводства.

Материалы и методы. Эксперимент проводился в вегетационной установке, в которой в трех камерах с помощью облучателей различного спектра излучения было создано индивидуальное для каждой камеры воздействие (по спектру) на биологические объекты (зеленые растения) при прочих равных условиях.

Результаты исследования. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить ряд разнообразных реакций на воздействие излучения определенного спектрального состава. Было обнаружено стабильное увеличение содержания треонина, фенилаланина, валина, серина, аланина и сахара у салата сорта Кук при выращивании под облучателем с регулируемым спектром. В то же время у салата сорта Хризолит выявлено стабильное снижение содержания данных веществ в тех же условиях. На содержание витамина С реакция обратная – снижение у салата сорта Кук, увеличение у салата сорта Хризолит под облучателем с регулируемым спектром. Для салата сорта Афицион реакция на содержание исследуемых веществ в обоих опытах дифференцирована несходная.

Обсуждение и заключение. Разработка и применение светодиодных облучателей с тонкой настройкой для управляемого растениеводства должны производиться на основе фотобиологических исследований с учетом специфических реакций отдельных сортов растений. Для этих целей предложено техническое решение с набором светодиодов, управляемых по отдельным каналам, с применением цифровых технологий.

© Долгих П. П., Трепуз С. В., Ханипова В. А., Сенкевич О. В., 2023



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

Ключевые слова: управляемое растениеводство, вегетационная установка, гидропонные технологии, светокультура, светодиодные облучатели, спектральный состав излучения, интенсивность излучения, качество растениеводческой продукции

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Результаты фотобиологических исследований по выращиванию салата под разноспектральными источниками излучения / П. П. Долгих [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 435–451. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.435-451>

Original article

Results of Photobiological Studies on Growing Lettuce under Multispectral Radiation Sources

P. P. Dolgikh^a✉, S. V. Trepuz^a, V. A. Khanipova^a, O. V. Senkevich^b

^a Krasnoyarsk State Agrarian University
(Krasnoyarsk, Russian Federation)

^b Prof. V. F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University
of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation
(Krasnoyarsk, Russian Federation)

✉ dpp10@yandex.ru

Abstract

Introduction. When growing plantations through using vertical farm technology, an important factor for regulating energy processes is electromagnetic radiation of irradiators with certain optical wavelengths.

Aim of the Article. The aim of the study was to substantiate the technology of application of LED radiation for growing green crops in vegetation facilities under conditions of multispectral radiation by determining the patterns of changes in the qualitative indicators of lettuce varieties Cook, Chrysolite and Afitsion and to create the concept of LED irradiators for controllable crop production.

Materials and Methods. The experiment was conducted in the vegetation facility, in three chambers of which different radiation (in spectrum) of biological objects (green plants) was created using irradiators of different spectrum, other things being equal.

Results. Experimental studies have determined a range of diverse reactions to radiation of a certain spectral composition. Stable increase in the content of threonine, phenylalanine, valine, serine, alanine and sugars was found in lettuce variety Cook grown under the irradiator with adjustable spectrum. At the same time, a stable decrease in the content of these substances was observed in lettuce variety Chrysolite grown under the irradiator with controlled spectrum. For vitamin C content, the reaction was the opposite: a decrease in vitamin C content in lettuce variety Cook and an increase in vitamin C content in lettuce variety Chrysolite grown in a spectrum-controlled irradiator. For lettuce variety Afitsion, the response to the content of the test substances was dissimilar in both experiments.

Discussion and Conclusion. The development and application of LED irradiators with fine turning for controlled crop production should be based on photobiological studies, taking into account specific responses of plantation varieties. For these purposes, there is proposed a technical solution with a set of LEDs controlled by individual channels using digital technologies.

Keywords: controlled crop production, vegetation facility, hydroponic technology, photoculture, LED irradiators, spectral composition of radiation, intensity of radiation, quality of crop production

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

For citation: Dolgikh P.P., Trepuz S.V., Khanipova V.A., Senkevich O.V. Results of Photobiological Studies on Growing Lettuce under Multispectral Radiation Sources. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):435–451. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.435-451>

Введение

Тепличная промышленность постоянно разрабатывает новые стратегии для увеличения урожайности, снижения любого связанного с этим негативного воздействия на окружающую среду и адаптации к новым требованиям рынка [1]. Поэтому технологии беспочвенного выращивания [2], автоматический контроль над факторами, составляющими микроклимат внутри теплицы [3], создание вертикальных агроэкосистем, которые могут быть расположены в городской среде [4] и другие перспективные направления находятся в постоянном развитии. Основным оборудованием при этом являются облучательные установки с высокой эффективностью в области фотосинтетически и физиологически активной радиации и возможностью динамического регулирования характеристик излучения в оптическом диапазоне (интенсивность, доза, спектр излучения) [5–7].

Согласно нормам искусственного освещения [8] для выращивания зеленных культур в условиях светокультуры растений, предлагаются технологии облучения, где предпочтительно использовать базовый спектр излучения, определяемый отношением синей (с), зеленой (з) и красной (к) областей в полном потоке фотонов фотосинтетически активной радиации (ФАР), %: 20 (с) – 0 (з) – 80 (к). Эффективный для растений и благоприятный для зрения персонала спектр с излучением в тех же областях ФАР, %: 20 (с) – 18 (з) – 62 (к). Спектр излучения в области ФАР стандартного источника D65 Международной комиссии по освещению (дневной свет с пропорциональным распределением энергии в синей, зеленой и красной зонах спектра), %: 30 (с) – 36 (з) – 34 (к). Изложенные технологии базируются на исследованиях,

проводимых в Национальном исследовательском университете «МЭИ» [9; 10].

Предлагаемые технологии, на наш взгляд, имеют отдельные недостатки. Во-первых, не учтено, что существенные различия в реакции на спектральный состав воздействующего излучения накладывают не только видовые, но и сортовые особенности растений [11; 12]. Во-вторых, оценка эффективности облучения только по продуктивности растений при нескольких различных спектрах облучения в области ФАР, без учета изменения качественных показателей (физико-химических свойств и химического состава), весьма ограничена, так как не соответствует современным стратегиям роста. Известно, что переменный спектр излучения может быть эффективно использован для получения продуктов с оптимизированными питательными веществами [13], улучшенными органолептическими показателями [14; 15], измененным содержанием микроэлементов [16] и др.

Целью исследования являлось обоснование технологии светодиодного облучения при выращивании зеленных культур в вегетационных установках в условиях излучения разноспектрального состава, путем определения закономерностей изменения качественных показателей салата сортов Кук, Хризолит и Афицион, и создания на их основе концепции светодиодного облучателя для управляемого растениеводства.

Обзор литературы

В литературах закрытого вертикального земледелия с использованием систем промышленного выращивания растений и установками искусственного облучения для производства продуктов питания [17] эффективно используются облучатели со светодиодными

источниками излучения благодаря их компактному размеру, относительно низкой температуре поверхности облучателя, высокой эффективности излучения, широкому спектру, а также большой гибкости для создания излучения с различными параметрами.

Например, источник излучения, содержащий несколько типов светодиодов с разными пиковыми длинами волн, может создавать излучение, спектральный состав которого может изменяться. Такие системы источников излучения были разработаны для исследовательских целей с 5-ю [18], 6-ю [19] и 32-мя [20–22] типами светодиодов для расширенного регулирования электромагнитного спектра излучения. Такие светодиодные источники излучения идеально подходят для проведения исследований по влиянию разнспектрального воздействия на ростовые процессы, показатели продуктивности и качественные показатели растений.

При выращивании растений применяют два метода облучения в отношении действительно или кажущегося непрерывного облучения в течение всего фотопериода. Наиболее распространенным методом является облучение, при котором излучение происходит непрерывно в течение фотопериода [23]. Другой – прерывистое облучение, в котором излучение происходит с перерывами в течение короткого временного цикла [24].

Простые и общие методы управления потоком излучения или диммирование светодиода включает в себя управление электрическим током, протекающим через светодиод [25; 26].

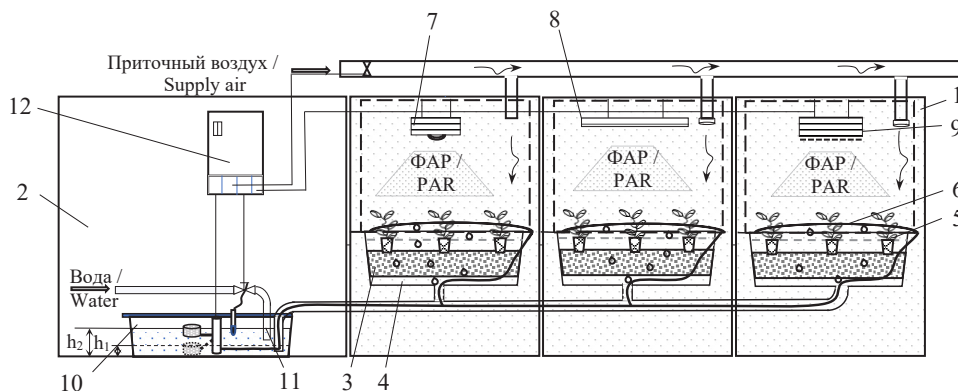
Другой метод управления интенсивностью излучения осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [25]. В этом методе светодиод многократно включается и выключается через короткие промежутки времени путем подачи и отключения постоянного электрического тока. Длительность

импульса равна периоду времени, в течение которого подается ток и происходит излучение в оптическом диапазоне.

Материалы и методы

Эксперимент проводился в вегетационной установке (рис. 1), в которой параметры микроклимата соответствовали рекомендациям [27], норма облученности поддерживалась на уровне $E = 150 \pm 10$ мкмоль/(м²·с) [8] путем регулирования высоты подвеса облучателей (была получена путем установки облучателя на высоте 0,6 м над облучаемой поверхностью при обеспечении коэффициента минимальной облученности $z = 0,8$), а комбинация фотопериода составляла: свет – 16 ч, темнота – 8 ч. В результате эксперимента необходимо было определить влияние различного спектра излучения на качественные показатели салата сортов Кук (К), Хризолит (Х) и Афицион (А) [28]: содержание сублимированной влаги, влаги в зелени, сахара, фенолов, аминокислот (треонин, серин, аланин, фенилаланин, валин), фруктозы, глюкозы, сахарозы, витамина С.

Согласно плану эксперимента в камерах для выращивания 1 вегетационной установки установлено три типа облучателей: в первой камере для выращивания (рис. 2а) – облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектрального распределения относительной фотосинтетической активности солнечного излучения 7 (контроль), где распределение в отдельных областях ФАР следующее – 33 % (с) – 33% (з) – 33 % (к); во второй (рис. 2б) – облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектральной чувствительности растений по К. Дж. McCree 8 (опыт 1), 20 % (с) – 30 % (з) – 50 % (к); в третьей (рис. 2с) – облучатель с регулируемым спектром 9 по трем каналам управления для трех участков спектра: синих (с), зеленых (з), красных (к) (опыт 2). Он должен работать по



Р и с. 1. Вегетационная установка: 1 – камеры для выращивания; 2 – технологический отсек; 3 – стеллаж для лотков с субстратом; 4 – поддон для слива питательного раствора; 5 – растения в горшках; 6 – поливочный шланг с перфорацией; 7 – облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектрального распределения относительной фотосинтетической активности солнечного излучения; 8 – облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектральной чувствительности растений по К. J. McCree; 9 – облучатель с регулируемым спектром; 10 – емкость для питательного раствора; 11 – доливочный трубопровод; 12 – щит управления

Fig. 1. Vegetation facility: 1 – growth chambers; 2 – technological compartment; 3 – shelf for trays with substrate; 4 – bottom for draining nutrient solution; 5 – plants in pots; 6 – irrigation hose with perforation; 7 – irradiator with radiation coinciding with the spectral distribution function of the relative photosynthetic activity of solar radiation; 8 – irradiator with radiation, coinciding with the function of spectral sensitivity of plantations according to K. J. McCree; 9 – irradiator with adjustable spectrum; 10 – container for the nutrient solution; 11 – watering pipe; 12 – control equipment

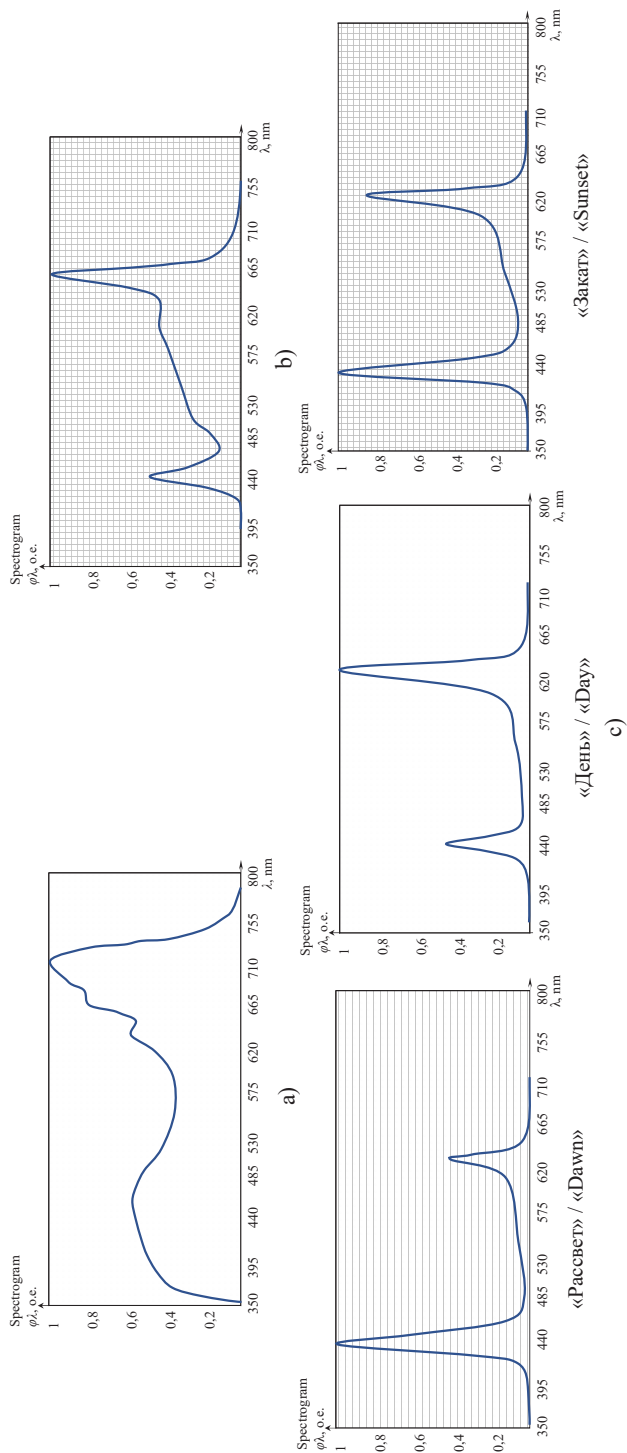
сценарию: 70 % (с) – 10 % (з) – 20 % (к) «рассвет» – продолжительность 2 ч; 10 % (с) – 10 % (з) – 80 % (к) «день» – 13 ч; 50 % (с) – 10 % (з) – 40 % (к) «закат» – продолжительность 1 ч.

Таким образом, в каждой камере для выращивания вегетационной установки с помощью облучателей различного спектра излучения создается индивидуальное воздействие (по спектру) на биологические объекты (зеленые растения) для проведения фотобиологических экспериментов.

В ходе проведения эксперимента семена высаживают в рассадные горшки с торфяным субстратом по три семени в каждый и помещают в камеру проращивания до стадии образования розетки. После этого в каждый стеллаж для лотков с субстратом 3 помещается по два горшка трех сортов салата. Устанавливаются маркеры сортов.

Electrical technologies and equipment

За определенный период во время выращивания часть питательного раствора усваивается растениями в горшках 5 и испаряется, после чего вода из доливочного трубопровода 11 дополняет емкость для питательного раствора 10. Регулярно после добавления поливочной воды с помощью рН-метра вручную осуществляется контроль уровня кислотности питательного раствора и поддержание его на уровне 5,5–6,5, а с помощью кондуктометра поддерживается уровень проводимости 1,85–1,89 мСм/см. Использовались удобрения Advancer Nutrients pH Perfect Bloom, pH Perfect Grow, pH Perfect Micro, которые заливались в емкость для питательного раствора 10 в равных пропорциях в среднем по 5–10 мл каждого на 1 литр воды. Весь цикл работы оборудования контролируется и регулируется с щита управления 12. На 35-е сутки производится уборка урожая.



Р и с. 2. Спектры излучения облучателей в эксперименте:

- a) облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектрального распределения относительной фотосинтетической активности солнечного излучения;
 - b) облучатель с излучением, совпадающим с функцией спектральной чувствительности растений по К. J. McCree;
 - c) облучатель с регулируемым спектром
- Fig. 2. Radiation spectra of the irradiators in the experiment:
 a) irradiator with radiation coinciding with the spectral distribution function of the relative photosynthetic activity of solar radiation;
 b) irradiator with radiation coinciding with the function of plantation spectral sensitivity according to K. J. McCree;
 c) irradiator with adjustable spectrum

Результаты исследования

На рисунке 3 представлены результаты химического анализа по содержанию незаменимых и заменимых аминокислот. По незаменимым кислотам салат был исследован на содержание треонина, фенилаланина, валина. Треонин, по данным ФАО, – одна из самых дефицитных аминокислот в питании человека и относится к абсолютно незаменимым, поэтому особенно актуальной задачей является получение продукции с повышенным его содержанием. Так, количество треонина, поддерживающего работу иммунной системы организма, а также необходимого для синтеза аминокислот серина и глицина, которые в свою очередь участвуют в синтезе коллагена и эластина, увеличивается по сравнению с контролем в первом опыте К – на 38 %, Х – на 8 %, А – на 17 %. Во втором опыте: рост содержания треонина К – на 59 %, снижение Х – на 8 %, А – на 30 %.

Несколько иную закономерность показывает содержание фенилаланина, влияющего на работу центральной нервной системы и участвующего в синтезе белков: снижается по сравнению с контролем в первом опыте К – на 13 %, увеличивается Х – на 9 %, А – на 6 %. Во втором опыте: рост содержания фенилаланина К – на 30 %, снижение Х – на 2 %, А – на 28 %.

Содержание валина, необходимого для метаболизма в мышцах, снижается в первом опыте для К – на 5 %, Х – на 33 %, А – на 7 %. Во втором опыте для К – увеличивается уровень валина на 40 %, снижается для Х – на 4 %, для А – на 35 %.

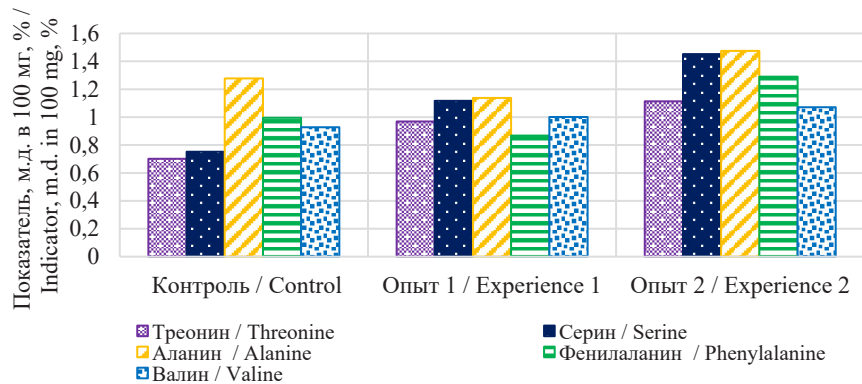
По заменимым кислотам салат исследован на содержание серина и аланина. Серин – важный компонент белков головного мозга и миелиновых оболочек, которые защищают нервные клетки от биохимических и механических повреждений. Между тем передозировка

аминокислоты токсична для нервных клеток. Содержание серина увеличивается в первом опыте для К – на 36 %, А – на 13 %, снижается Х – на 12,5 %. Во втором опыте для К – увеличивается уровень серина на 70 %, снижается для Х – на 8 %, для А – на 38 %.

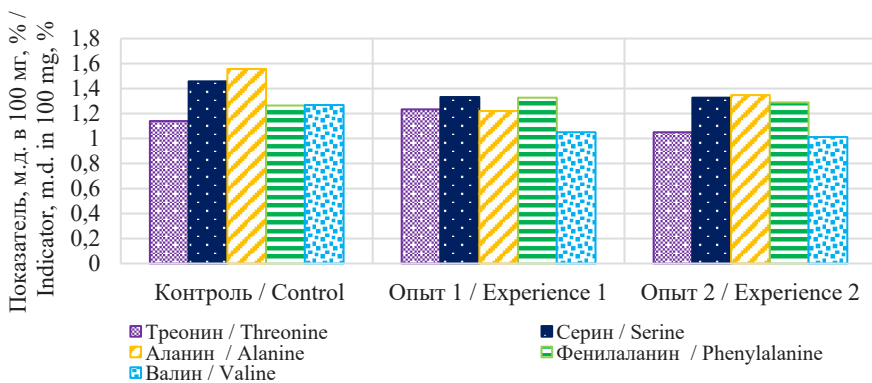
Аланин – аминокислота, используемая в качестве «стройматериала» для кортизона, который, согласно исследованиям [29], может повышать выносливость и предотвращать быстрое старение. Закономерность изменения содержания аланина следующая: в первом опыте снижается для К – на 14 %, Х – на 33,5 %, А – на 76 %. Во втором опыте для К – увеличивается уровень аланина на 19,7 %, для А – на 27,5 %, снижается для Х – на 20,8 %.

Известно, что вода в пищевых продуктах играет важную роль, так как обуславливает консистенцию и структуру продукта, а ее взаимодействие с присутствующими компонентами определяет устойчивость продукта при хранении [30]. Для оценки водной активности был проведен физико-химический анализ по содержанию сублимированной влаги, % (рис. 4а) и влаги в зелени, % (рис. 4б) в исследуемых образцах салата. По данному показателю все исследуемые образцы салата относятся к продуктам с высокой влажностью.

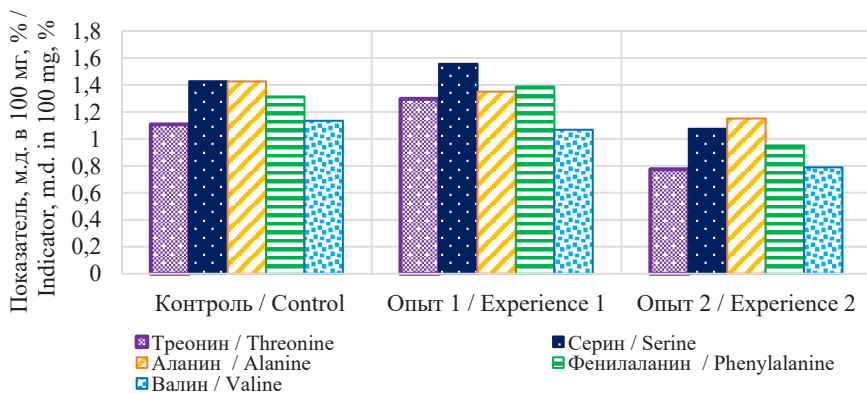
Из рисунка 4 следует, что наибольшее содержание сублимированной влаги (12,2 %) остается в образце салата сорта Хризолит, выращенном под облучателем с излучением, совпадающим с функцией спектральной чувствительности растений по К. Дж. МакКри. Влаг в зелени (96,5 %) содержится в большем количестве в образце салата сорта Кук, выращенном под облучателем с излучением, совпадающим с функцией спектрального распределения относительной фотосинтетической активности солнечного излучения (контроль).



a)



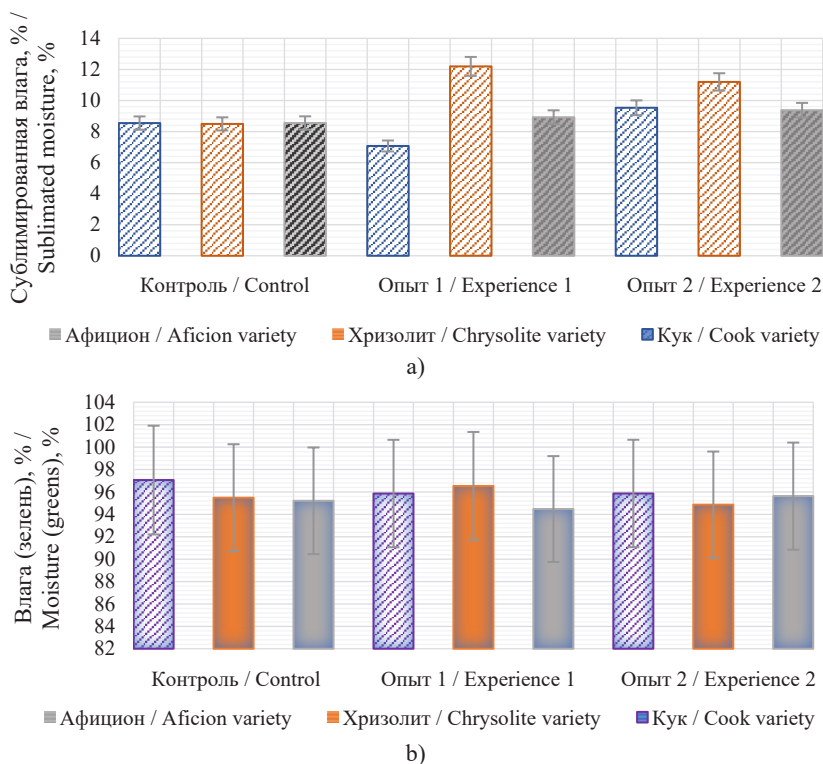
b)



c)

Р и с. 3. Результаты химического анализа по содержанию незаменимых и заменимых аминокислот: а) сорт Кук; б) сорт Хризолит; в) сорт Афицион

Fig. 3. Results of chemical analysis on the content of nonreplaceable and dispensable amino acids: a) lettuce variety Cook; b) lettuce variety Chrysolite; c) lettuce variety Afitsion



Р и с. 4. Содержание влаги в исследуемых образцах салата:
а) сублимированная влага, %; б) влага в зелени, %

F i g. 4. Moisture content in the studied samples of lettuce:
а) sublimated moisture, %; б) moisture in greens, %

Листовые овощи и зелень являются главным поставщиком витамина С, так как потребляются в сыром виде, что обеспечивает сохранность этого крайне нестойкого водорастворимого витамина. В листовом салате в среднем содержится 5–15 мг/100 г аскорбиновой кислоты, что обеспечивает около 20 % суточной нормы. Анализ показателей по содержанию витамина С, являющегося антиоксидантом, обеспечивающим прямую защиту белков, жиров, ДНК и РНК клеток от повреждающего действия свободных радикалов, показывает (рис. 5а) снижение у салата Кук в опыте 1 – на 8 %, в опыте 2 – на 13 %. Салат сорта Хризолит продемонстрировал наибольшую отзывчивость к изменению

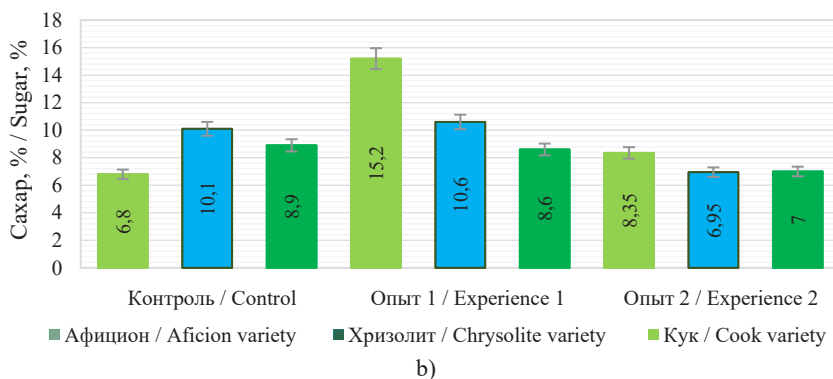
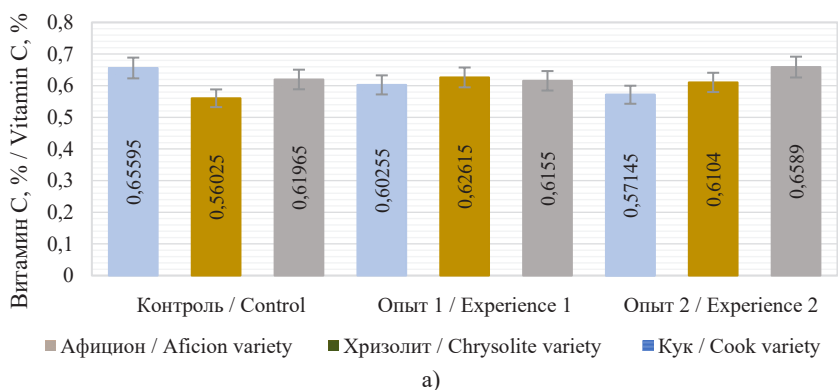
электромагнитного воздействия. В опыте 1, по сравнению с контролем, количество витамина С возросло на 12 %, в опыте 2 – на 9 %. Оптимальным для салата Афицион является регулируемый спектр – содержание витамина С возросло на 6 % в сравнении с контролем и спектром опыта 1.

Результаты химического анализа по содержанию фруктозы, глюкозы, сахара представлены в таблице 1.

Процентное содержание сахара повышается в опыте 1 у салата Кук на 220 %, по сравнению с контролем, а в опыте 2 у салата Хризолит – снижается на 69 %. С точки зрения потребительских свойств, сахара улучшают вкусовые качества салата и его

питательность. Для сортов Кук и Хризолит наиболее оптимальным по накоплению сахаров являются параметры

облучения опыта 1 (по К. J. McCree). Содержание фенола во всех экспериментальных образцах менее 0,0005 мг/л.



Р и с. 5. Содержание в исследуемых образцах: а) витамина С, %; б) сахара, %
 F i g. 5. Content in the studied samples: a) vitamin C, %; b) sugar, %

Т а б л и ц а 1
 T a b l e 1

Показатели анализа по содержанию фруктозы, глюкозы, сахарозы
Analysis of fructose, glucose, and sucrose content

Показатель / Indicator	Фруктоза, г/л (%) 10 ⁻³ / Fructose, g/l (%)10 ⁻³			Глюкоза, г/л (%)10 ⁻³ / Glucose, g/l (%)10 ⁻³			Сахароза, г/л (%)10 ⁻³ / Sucrose, g/l (%)10 ⁻³		
	К	А	Х	К	А	Х	К	А	Х
Контроль / Control	-	26 (53)	43 (86)	-	52,65 (105,4)	68,45 (136,5)	-	-	-
Опыт 1 / Experience 1	-	96,5 (19,4)	25,4 (50,8)	37 (74)	19,71 (214,1)	22,1 (44,3)	-	53 (106)	-
Опыт 2 / Experience 2	-	-	-	76,5 (152,9)	31,3 (62,6)	67,4 (134,8)	-	-	-

Приведенные экспериментальные данные позволили установить ряд разнообразных реакций на воздействие излучения определенного спектрального состава. Это позволяет сделать вывод о возможности практического использования различных режимов облучения для регулирования физико-химических свойств и химического состава салата сортов Кук, Хризолит Афицион. Стабильное увеличение содержания треонина, фенилаланина, валина, серина, аланина и сахара было установлено у салата сорта Кук при выращивании под облучателем с регулируемым спектром. В то же время у салата сорта Хризолит было установлено стабильное снижение содержания по данным веществам при выращивании под облучателем с регулируемым спектром. На содержание витамина С реакция обратная – снижение у салата сорта Кук, увеличение у салата сорта Хризолит. Для салата сорта Афицион реакция на содержание исследуемых веществ в обоих опытах дифференцирована несходная.

Таким образом, полученные результаты явились основой для разработки концепции светодиодного облучателя для управляемого растениеводства, схема которого представленного на рисунке 6.

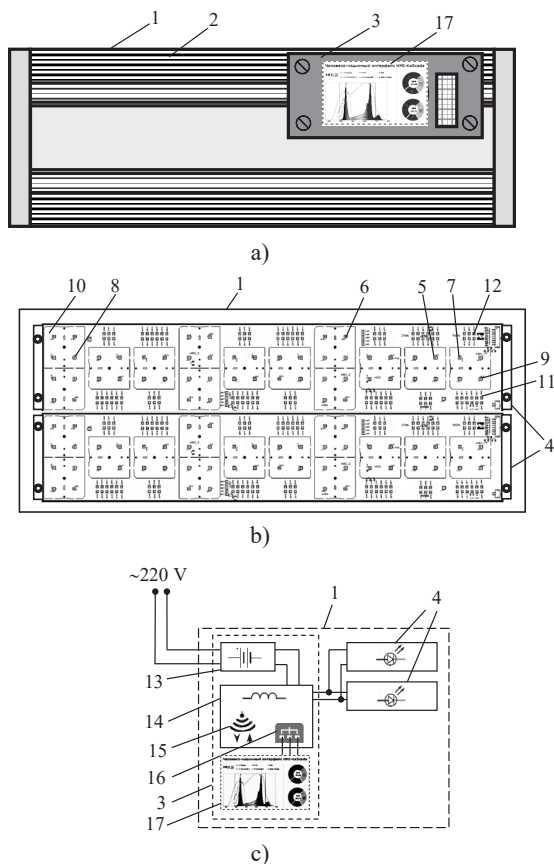
Светодиодный облучатель для растениеводства работает следующим образом. При включении светодиодного облучателя для растениеводства в сеть напряжение подается на драйвер питания 13 и далее через многоканальный блок управления 14 ток поступает на светодиодные модули 4. Оператор посредством операторской панели 17 через проводной интерфейс связи 16, устанавливает максимальный уровень излучения оптического спектра, регулируя силу тока до предельного значения для каждого типа светодиодов посредством многоканального блока управления 14. Светодиодный облучатель для растениеводства начинает

излучать фотосинтезный поток фотонов благодаря светодиодам теплого белого света 11 с цветовой температурой $T_c = 2700$ К и светодиодам холодного белого света 12 с цветовой температурой $T_c = 6500$ К. Притом выраженные энергетические пики излучения на длине волны $\lambda = 380$ нм создаются светодиодами фиолетового излучения 5, на длине волны $\lambda = 440, 465$ нм – светодиодами синего излучения 6, на длине волны $\lambda = 630$ нм – светодиодами красного излучения 7, на длине волны $\lambda = 660$ нм – светодиодами темно-красного излучения 8 и на длине волны $\lambda = 730$ нм – светодиодами дальнего красного излучения 9, для усиления эффекта излучения которых они объединены при помощи рассеивателя 10 в тринадцать секторов по четыре светодиода в каждом секторе (рис. 6b). Полученный график спектра при этом отображается на операторской панели 17 (рис. 6a), подсоединенной посредством проводного интерфейса связи 16 к многоканальному блоку управления 14.

Далее в процессе настройки технологического процесса выращивания при проведении экспериментов по определению оптимальных параметров и режимов облучения (спектра, интенсивности и дозы) для той или иной культуры растений оператор посредством операторской панели 17 через проводной интерфейс связи 19 регулирует силу тока от нуля до предельного значения для каждого типа светодиодов на светодиодных модулях 4 посредством многоканального блока управления 14, тем самым уменьшая или увеличивая интенсивность излучения фотосинтезного потока фотонов в целом, так и интенсивность излучения каждого пика излучения по отдельности (рис. 6с).

Обсуждение и заключение

Произведенная оценка влияния излучения разноспектрального состава на закономерности изменения качественных показателей салата различных



Р и с. 6. Светодиодный облучатель для растениеводства:

а) вид сверху; б) вид снизу; в) схема конструктивных взаимосвязей

- 1 – корпус; 2 – радиатор; 3 – блок питания и управления; 4 – светодиодные модули;
 5 – светодиоды фиолетового излучения ($\lambda = 380$ нм); 6 – светодиоды синего излучения ($\lambda = 440, 465$ нм);
 7 – светодиоды красного излучения ($\lambda = 630$ нм); 8 – светодиоды темно-красного излучения ($\lambda = 660$ нм);
 9 – светодиоды дальнего красного излучения ($\lambda = 730$ нм); 10 – рассеиватель; 11 – светодиоды
 теплого белого света ($T_c = 2700$ К); 12 – светодиоды холодного белого света ($T_c = 6500$ К);
 13 – драйвер питания; 14 – многоканальный блок управления; 15 – беспроводной Wi-Fi модуль;
 16 – проводной интерфейс связи (например, RS-485); 17 – операторская панель

F i g. 6. LED irradiator for crop production:

a) top view; b) bottom view; c) scheme of design interconnections

- 1 – housing; 2 – irradiator; 3 – power supply and control unit; 4 – LED modules;
 5 – LED violet radiation ($\lambda = 380$ nm); 6 – LED blue radiation ($\lambda = 440, 465$ nm);
 7 – LED red radiation ($\lambda = 630$ nm); 8 – LED dark red radiation ($\lambda = 660$ nm);
 9 – LED deep red radiation ($\lambda = 730$ nm); 10 – diffuser; 11 – warm white light LEDs ($T_c = 2700$ K);
 12 – cold white light LEDs ($T_c = 6500$ K); 13 – power driver; 14 – multichannel control unit;
 15 – wireless Wi-Fi module; 16 – wire communication interface (for example RS-485);
 17 – operator terminal

сортов подтвердила гипотезу о применимости разрабатываемых способов облучения для практического использования в технологиях регулируемого

растениеводства при получении функциональных продуктов питания.

В дальнейшем разработка и применение светодиодных облучателей с тонкой

настройкой в технологиях управляемого растениеводства должны производиться на основе фотобиологических исследований, в которых применяется концепция предложенного светодиодного облучателя для растениеводства, включающего разделение цветных светодиодов по секторам, а светодиодов белого света по группам, с возможностью их регулирования по отдельным каналам через

многоканальный блок управления путем отдельной регулировки тока в пределах от 0 до 100 %, тем самым уменьшая или увеличивая как интенсивность излучения фотосинтезного потока фотонов в целом, так и интенсивность излучения каждого пика излучения по отдельности, в зависимости от требований технологии выращивания растений, с применением цифровых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Current Trends in Protected Cultivation in Mediterranean Climates / J. A. Fernandez [et al.] // European Journal of Horticultural Science. 2018. Vol. 83, Issue 5. P. 294–305. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.3>
2. Hydroponic Technology as Decentralised System for Domestic Wastewater Treatment and Vegetable Production in Urban Agriculture: A Review / S. T. Magwaza [et al.] // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 698. Article no. 134154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>
3. Review of Optimum Temperature, Humidity, and Vapour Pressure Deficit for Microclimate Evaluation and Control in Greenhouse Cultivation of Tomato: A Review / R. R. Shamshiri [et al.] // International Agrophysics. 2018. Vol. 32. P. 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
4. Al-Kodmany K. The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City // Buildings. 2018. Vol. 8, Issue 2. P. 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
5. Концептуальные подходы к выбору спектра излучения ламп для выращивания растений в искусственных условиях / А. А. Тихомиров [и др.] // Светотехника. 2019. № 5. С. 19–23. EDN: NJIQCE
6. Prikupets L. B., Terekhov V. G. The Effect of the Irradiation Dose and Time Factors on Producing Capacity of Lettuce and Leaf Vegetables in Photo-Culture Conditions // Light & Engineering. 2022. Vol. 30, Issue 5. P. 4–11. EDN: ZZAVRG
7. Amoozgar A., Mohammadi A., Sabzalian M. R. Impact of Light-Emitting Diode Irradiation on Photosynthesis, Phytochemical Composition and Mineral Element Content of Lettuce cv. Grizzly // Photosynthetica. 2017. Vol. 55, Issue 1. P. 85–95. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0216-8>
8. ПНСТ 4 1 0-2020. Светокультура растений. Нормы искусственного освещения для зеленных культур. М.: ФГБНУ «Росинформаротех», 2020. 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720005.pdf> (дата обращения: 03.03.2023).
9. Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленных культур / Л. Б. Прикупец [и др.] // Светотехника. 2018. № 5. С. 6–12. EDN: YOGLPV
10. Оптимизация светотехнических параметров при светокультуре салатно-зеленных растений с использованием светодиодных излучателей / Л. Б. Прикупец [и др.] // Светотехника. 2019. № 4. С. 6–13. EDN: DXETPS
11. Долгих П. П., Хусенов Г. Н. Влияние параметров облучения на урожайность и качественные характеристики салата сортов Крилда и Аувона // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6 (141). С. 154–161. URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2018_6/content/31.pdf (дата обращения: 01.02.2023).
12. Nicole C. C. S., Krijn M. P. C. M., van Slooten U. Chapter 1.4 – Postharvest Quality of Leafy Greens Growing in a Plant Factory // Plant Factory Using Artificial Light / M. Anpo [et al.]. Elsevier, 2019. P. 33–43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00005-1>

13. Князева И. В. Искусственное освещение для получения функциональных продуктов питания // Вестник КрасГАУ. 2020. № 12 (165). С. 25–31. EDN: OEPPH
14. Effects of LED Lighting Recipes on Postharvest Quality of Leafy Vegetables Grown in a Vertical Farm / C. C. S. Nicole [et al.] // ISHS Acta Horticulturae 1256: VI International Conference Postharvest Unlimited. 2019. Vol. 1256. P. 481–488. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1256.68>
15. Kelly N., Runkle E. S. Spectral Manipulations to Elicit Desired Quality Attributes of Herbaceous Specialty Crops // European Journal of Horticultural Science. 2020. Vol. 85, Issue 5. P. 339–343. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.5>
16. Особенности влияния спектра излучения на продуктивность и биохимический состав тестовых плодовых и листовых овощных культур / Т. Э. Кулешова [и др.] // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 7. С. 1060–1068. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.07.52663.343-21>
17. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Second Edition. Academic Press, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00969-X>
18. Fujiwara K., Yano A., Eijima K. Design and Development of a Plant-response Experimental Light-source System with LEDs of Five Peak Wavelengths. // Journal of Light & Visual Environment. 2011. Vol. 35, Issue 2. P. 117–122. <https://doi.org/10.2150/jlve.35.117>
19. Fujiwara K., Yano A. Prototype Development of a Plant-response Experimental Light-source System with LEDs of Six Peak Wavelengths. ISHS Acta Horticulturae 970: International Conference on Quality Management in Supply Chains of Ornamentals QMSCO2012. 2013. Vol. 970. P. 341–346. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.970.41>
20. Fujiwara K., Sawada T. Design and Development of an LED-artificial Sunlight Source System Prototype Capable of Controlling Relative Spectral Power Distribution // Journal of Light & Visual Environment. 2006. Vol. 30, Issue 3. P. 170–176. <https://doi.org/10.2150/jlve.30.170>
21. Fujiwara K., Yano A. Controllable Spectrum Artificial Sunlight Source System Using LEDs with 32 Different Peak Wavelengths of 385–910 nm // Bioelectromagnetics. 2011. Vol. 32, Issue 3. P. 243–252. <https://doi.org/10.1002/bem.20637>
22. Fujiwara K., Eijima K., Yano A. Second-generation LED-artificial Sunlight Source System Available for Light Effects Research in Biological and Agricultural Sciences Proceedings of 7th LuxPacifica, 2013. P. 140–145. <https://doi.org/10.1002/bem.20637>
23. Долгих П. П. Способы облучения растений в теплицах и их техническая реализация // Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии (23–24 мая 2019 г.)». п. Молодежный : Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского. 2019. С. 23–31. EDN: OIQJQF
24. Jishi T., Matsuda R., Fujiwara K. Effects of Photosynthetic Photon Flux Density, Frequency, Duty Ratio, and their Interactions on Net Photosynthetic Rate of cos Lettuce Leaves under Pulsed Light: Explanation Based on Photosynthetic-intermediate Pool Dynamics // Photosynthesis Research. 2018. Vol. 136. P. 371–378. <https://doi.org/10.1007/s1120-017-0470-z>
25. Рентюк В. Светодиод – такой знакомый и неизвестный. Ч. 3. Управление яркостью // Полупроводниковая светотехника. 2017. Т. 3, № 47. С. 54–61. EDN: ZBIDNJ
26. Yurtseven M., Mete S., Onaygil S. The Effects of Temperature and Driving Current on the Key Parameters of Commercially Available, High-power, white LEDs // Lighting Research & Technology. 2016. Vol. 48, Issue 8. P. 943–965. <https://doi.org/10.1177/14771535155767>
27. Шуничев С. И., Савинова Н. И., Попов Г. Ф. Технология промышленного производства овощей в зимних теплицах. М. : Агропромиздат, 1987. 109 с.
28. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). М. : ФГБНУ «Росинформагротех». 2021. 719 с. URL: <https://ogorodum.ru/docs/gosreestr-rus.pdf> (дата обращения: 03.03.2023).
29. Лысиков Ю. А. Аминокислоты в питании человека // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2012. № 2. С. 88–105. EDN: TBJPRX

30. Нечаев А. П., Траубенберг С. Е., Кочеткова А. А. Пищевая химия. 2-е изд. СПб. : ГИОРД, 2003. 640 с. https://najar.files.wordpress.com/2012/10/studmed-ru_nechaev-ap-i-dr-pischevaya-himiya_dfd0f24503d.pdf (дата обращения: 03.03.2023).

Поступила 02.02.2023; одобрена после рецензирования 19.03.2023; принята к публикации 03.04.2023.

Об авторах:

Долгих Павел Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системознергетики Красноярского государственного аграрного университета (660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Мира, д. 90), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>, dpp10@yandex.ru

Трепуз Сергей Валерьевич, аспирант кафедры системознергетики Красноярского государственного аграрного университета (660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Мира, д. 90), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0699-6788>, mail@growshop24.ru

Ханипова Вера Александровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры эпизоотологии, микробиологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы Института прикладной биотехнологии и ветеринарной медицины, директор научно-исследовательского испытательного центра Красноярского государственного аграрного университета (660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Мира, д. 90), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3088-2628>, gasi.vera@yandex.ru

Сенкевич Олеся Владимировна, кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры биологической химии с курсами медицинской, фармацевтической и токсикологической химии Красноярского государственного медицинского университета имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого Министерства здравоохранения Российской Федерации (660022, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, зд. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2295-4329>, senk-olesya@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

- П. П. Долгих – формулирование основной концепции исследования, подготовка текста статьи.
- С. В. Трепуз – проведение экспериментов, анализ и дополнение текста статьи.
- В. А. Ханипова – сбор и обработка материалов, анализ полученных результатов.
- О. В. Сенкевич – участие в обсуждении материалов статьи, критический анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Fernandez J.A., Orsini F., Baeza E., Oztekin G.B., Munoz P., Contreras J., et al. Current Trends in Protected Cultivation in Mediterranean Climates. *European Journal of Horticultural Science*. 2018;83(5):294–305. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.3>
2. Magwaza S.T., Magwaza L.S., Odindo A.O., Mditshwa A. Hydroponic Technology as Decentralised System for Domestic Wastewater Treatment and Vegetable Production in Urban Agriculture: A Review. *Science of The Total Environment*. 2020;698:134154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>
3. Shamshiri R.R., Jones J.W., Thorp K.R., Ahmad D., Man H.C., Taheri S. Review of Optimum Temperature, Humidity, and Vapour Pressure Deficit for Microclimate Evaluation and Control in Greenhouse Cultivation of Tomato: A Review. *International Agrophysics*. 2018;32:287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
4. Al-Kodmany K. The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*. 2018;8(2):24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
5. Tikhomirov A.A., Ushakova S.A., Shikhov E.S., Shklavtsova V.N. Conceptual Approaches to the Selection of the Radiation Spectrum of Lamps for Growing Plants in Artificial Conditions. *Light & Engineering*. 2019;(5):19–23.

6. Prikupets L.B., Terekhov V.G. The Effect of the Irradiation Dose and Time Factors on Producing Capacity of Lettuce and Leaf Vegetables in Photo-Culture Conditions. *Light & Engineering*. 2022;30(5):4–11.
7. Amoozgar A., Mohammadi A., Sabzalian M.R. Impact of Light-Emitting Diode Irradiation on Photosynthesis, Phytochemical Composition and Mineral Element Content of Lettuce cv. Grizzly. *Photosynthetica*. 2017;55(1):85–95. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0216-8>
8. [PNST 4 1 0-2020. Light Culture of Plants. Norms of Artificial Light for Green Crops]. Moscow: Rosinformagrotech Publ.; 2020. Available et: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720005.pdf> (accessed 03.03.2023). (In Russ.)
9. Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. Study of the Effect of Radiation in Different Ranges of the PAR on Productivity and Biochemical Composition of Biomass of Salad Green Crops. *Light & Engineering*. 2018;(5):6–12.
10. Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. Optimization of Light-technical Parameters in Light Culture of Salad-Green Plants Using Light-Iodine Emitters. *Svetotekhnika*. 2019;(4):6–13.
11. Dolgikh P.P., Khusenov G.N. The Influence of Irradiation Parameters on the Yield and Quality Characteristics of Lettuce Varieties Krilda and Auvon. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2018;(6):154–161. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2018_6/content/31.pdf (accessed 01.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Nicole C.C.S., Krijn M.P.C.M., van Slooten U. Postharvest Quality of Leafy Greens Growing in a Plant Factory. In: M. Anpo, H. Fukuda, T. Wada, et al. *Plant Factory Using Artificial Light, Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation*. Amsterdam: Elsevier; 2019. p. 33–43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00005-1>
13. Knyazeva I.V. Artificial Light for Obtaining Functional Products Pitation. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2020;(12):25–31.
14. Nicole C.C.S., Mooren J., Pereira Terra A.T., Larsen D.H., Woltering E.J., Marcelis L.F.M., [et al.]. Effects of LED Lighting Recipes on Postharvest Quality of Leafy Vegetables Grown in a Vertical Farm. *Acta Horticulturae*. 2019;1256:481–488. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1256.68>
15. Kelly N., Runkle E.S. Spectral Manipulations to Elicit Desired Quality Attributes of Herbaceous Specialty Crops. *European Journal of Horticultural Science*. 2020;85:339–343. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.5>
16. Kuleshova T.E., Udalova O.R., Balashova I.T., Anikina L.M., Kononchuk P.Yu., Dubovitskaya V.I., et al. Features of the Influence of the Radiation Spectrum on Productivity and Biochemical Composition of Test Fruit and Leafy Vegetable Crops. *Journal of Technical Physics*. 2022;92(7):1060–1068. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.07.52663.343-21>
17. Kozai T., Niu G., Takagaki M. *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. 2nd ed. Academic press; 2020. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00969-X>
18. Fujiwara K., Yano A., Eijima K. Design and Development of a Plant-Response Experimental Light-Source System with LEDs of Five Peak Wavelengths. *Journal of Light & Visual Environment*. 2011;35(2):117–122. <https://doi.org/10.2150/jlve.35.117>
19. Fujiwara K., Yano A. Prototype Development of a Plant-Response Experimental Light-source System with LEDs of Six Peak Wavelengths. *Acta Horti*. 2013;970:341–346. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.970.41>
20. Fujiwara K., Sawada T. Design and Development of an LED-Artificial Sunlight Source System Prototype Capable of Controlling Relative Spectral Power Distribution. *Journal of Light & Visual Environment*. 2006;30(3):170–176. <https://doi.org/10.2150/jlve.30.170>
21. Fujiwara K., Yano A. Controllable Spectrum Artificial Sunlight Source System Using LEDs with 32 Different Peak Wavelengths of 385-910 nm. *Bioelectromagnetics*. 2011;32(3):243–252. <https://doi.org/10.1002/bem.20637>
22. Fujiwara K., Eijima K., Yano A. Second-Generation LED-Artificial Sunlight Source System Available for Light Effects Research in Biological and Agricultural Sciences. In: *Proceedings of 7th Lux-Pacifica*. 2013. p. 140–145. <https://doi.org/10.1002/bem.20637>

23. Dolgikh P.P. [Methods of Irradiation of Plants in Greenhouses and their Technical Implementation]. In: Proceedings of 8th International Scientific-Practical Conference: Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia (May 23–24, 2019). Molodezhny: Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky; 2019. p. 23–31. (In Russ.)
24. Jishi T., Matsuda R., Fujiwara K. Effects of Photosynthetic Photon Flux Density, Frequency, Duty Ratio, and their Interactions on Net Photosynthetic Rate of Cos Lettuce Leaves under Pulsed Light: Explanation Based on Photosynthetic-Intermediate Pool Dynamics. *Photosynthesis Research*. 2018;136:371–378. <https://doi.org/10.1007/s11120-017-0470-z>
25. Rentiuk V. LED – so Familiar and Unknown. Part 3. Brightness Control. *Semiconductor Lighting Engineering*. 2017;3(47):54–61. (In Russ.)
26. Yurtseven M., Mete S., Onaygil S. The Effects of Temperature and Driving Current on the Key Parameters of Commercially Available, High-Power, White LEDs. *Lighting Research & Technology*. 2016;48(8):943–965. <https://doi.org/10.1177/14771535155767>
27. Shunichev S.I., Savinova N.I. Popov G.F. [Technology of Industrial Production of Vegetables in Winter Greenhouses]. Moscow: Agropromizdat; 1987. (In Russ.)
28. [State Register of Breeding Achievements Approved for Use]. Vol. 1 Plant Varieties (Official Edition). Moscow: Rosinformagrotech; 2021. Available at: <https://ogorodum.ru/docs/gosreestr-rus.pdf> (accessed 03.03.2023). (In Russ.)
29. Lysikov Y.A. [Amino Acids in Human Nutrition]. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2012;(2):88–105. (In Russ.)
30. Nechaev A.P., Traubenberg S.E., Kochetkova A.A. [Food Chemistry]. SPb: GIORD; 2003. Available at: https://najar.files.wordpress.com/2012/10/studmed-ru_nechaev-ap-i-dr-pischevaya-himiya_dfdf0f24503d.pdf (accessed 03.03.2023). (In Russ.)

Submitted 02.02.2023; revised 19.03.2023; accepted 03.04.2023.

About the authors:

Pavel P. Dolgikh, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Associate Professor of Chair of System Power Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University (90 Prospekt Mira, Krasnoyarsk 660049, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>, dpp10@yandex.ru

Sergey V. Trepuz, Postgraduate Student of Chair of System Power Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University (90 Prospekt Mira, Krasnoyarsk 660049, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0699-6788>, mail@growshop24.ru

Vera A. Khanipova, Cand.Sci. (Biol.), Associate Professor of Chair of Epizootology, Microbiology, Parasitology and Veterinary Sanitary Expertise, Institute of Applied Biotechnology and Veterinary Medicine. Director of Research Test Center, Krasnoyarsk State Agrarian University (90 Prospekt Mira, Krasnoyarsk 660049, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3088-2628>, Gasi.vera@yandex.ru

Olesya V. Senkevich, Cand.Sci. (Biol.), Senior Lecturer of Chair of Biological Chemistry with Courses in Medical, Pharmaceutical and Toxicological Chemistry, Prof. V. F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (bd 1 Partizan Zheleznyak St., Krasnoyarsk 660022, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2295-4329>, senk-olesya@mail.ru

Authors contribution:

P. P. Dolgikh – formulating the study main concept, preparing the article text.

S. V. Trepuz – conducting experiments, analyzing and supplementing the article text.

V. A. Khanipova – collecting and processing materials, analyzing the results.

O. V. Senkevich – participation in the discussion of the article materials, critical analysis and revision of the text.

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 «iThenticate».

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 iThenticate systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Aim of the Article;

3) Materials and Methods;

4) Results;

5) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) Introduction. It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) Literature Review. It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods. This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) Results. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Authors contribution.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levitsev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *У. А. Сновальникова*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 20.09.2023 г. Дата выхода в свет 29.09.2023 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 13,33.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 698. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»)



Editor *U. A. Snovalnikova*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 20.09.2023. Date of publishing 29.09.2023.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 13.33.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 100 copies. Order no. 698. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)