

doi: 10.15507/2658-4123.032.202202

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

Том 32, № 2. 2022

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

16+



Vol. 32, no. 2. 2022

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

Индексируется и архивируется в Web of Science Core Collection (ESCI),
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также EBSCO

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),
Committee on Publication Ethics (COPE),
Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef
Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство ПИ № ФС77-74640 от 24.12.2018 г.

Подписной индекс – **70539**

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

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

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2022

Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

публикует оригинальные научные статьи (Full Articles) на русском и английском языках, ранее не публиковавшиеся в других изданиях. Миссия заключается в публикации результатов научных исследований, способствующих развитию науки в области инженерных систем и технологий.

Журнал адресован исследователям, аналитикам и практикам в области физики и сельскохозяйственного производства, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами технических наук.

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки (по состоянию на 25.05.2022 г.):

05.20.01. Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

05.20.02. Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве (технические науки)

05.20.03. Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве (технические 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)

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

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



The scientific journal **Engineering Technologies and Systems**

publishes original scientific articles (full articles) in Russian and English, which have not been previously published in other publications. The mission of the journal is to publish research results that contribute to the advancement of knowledge in area of engineering systems and technology.

The journal is addressed to researchers, analysts and practitioners in the fields of physics and agricultural production, as well as readers interested in engineering problems.

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

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

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

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

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as at 25 May 2022):

Technologies and Means of Agricultural Mechanization
Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture
Technologies and Means of Maintenance in Agriculture
Instruments and Methods of Experimental Physics
Optics
Electrophysics, Electrophysical Installations

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

EBSCO

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),
Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication
Ethics (COPE), Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef
and the international community of reviewers Publons

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – 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, доктор биологических наук (Бартын, Турция)

Астахов Михаил Владимирович – профессор кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана», доктор технических наук, ORCID: 0000-0001-8675-1611 (Калуга, Российская Федерация)

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

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

Дайфен Чжень – заместитель декана Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологии, директор Международной объединенной лаборатории по экологической энергетике судов и контролю выбросов Цзянсу, Ph.D., профессор, ORCID: 0000-0002-3070-1989 (Чжэньцзян, Китай)

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

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

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

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

Истомина Наталья Леонидовна – 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», доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

Кухарев Олег Николаевич – ректор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-3519-4066 (Пенза, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

Прытков Юрий Николаевич – директор Аграрного института ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Российская Федерация)

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

Рябочкина Полина Анатольевна – научный руководитель лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-8503-8486 (Саранск, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Svetlana V. Gordina – *Executive Editor*, Member of European Association of Science Editors (EASE), Cand.Sci. (Ped.), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Surkhay Allahverdiyev – 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, Dr.Sci. (Biol.) (Bartın, Turkey)

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

Alexey G. Bulgakov – 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, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Dresden, Germany)

Chen Daifen – Vice 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, Ph.D., Professor, ORCID: 0000-0002-3070-1989 (Zhenjiang, China)

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

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

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

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

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

Natalia L. Istomina – 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, Dr.Sci. (Phys.-Math.), ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Moscow, Russian Federation)

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

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

- Oleg N. Kukharev** – Rector of Penza State Agrarian University, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: [0000-0002-3519-4066](https://orcid.org/0000-0002-3519-4066) (Penza, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Head of the Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of the College of Arts and Sciences, Khalifa University, Ph.D. (Abu Dhabi, UAE)
- Yakov P. Lobachevskiy** – First Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Academician of RAS, ORCID: [0000-0001-7863-2962](https://orcid.org/0000-0001-7863-2962) (Moscow, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Professor of the Chair of Electronics, MIREA – Russian Technological University, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: [0000-0001-6992-455X](https://orcid.org/0000-0001-6992-455X) (Moscow, Russian Federation)
- Andrey Yu. Nesmiyan** – Deputy Director for Research and Innovation, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: [0000-0002-5556-1767](https://orcid.org/0000-0002-5556-1767) (Zernograd, Russian Federation)
- Valeriy V. Ostrikov** – 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, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: [0000-0003-2927-768X](https://orcid.org/0000-0003-2927-768X) (Tambov, Russian Federation)
- Sergey A. Plotnikov** – Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: [0000-0002-8887-4591](https://orcid.org/0000-0002-8887-4591) (Kirov, Russian Federation)
- Yuriy N. Prytkov** – Director of the Institute of Agriculture, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (Agric.), Professor (Saransk, Russian Federation)
- Feliks Ya. Rudik** – Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: [0000-0001-8444-0115](https://orcid.org/0000-0001-8444-0115) (Saratov, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Chief Scientific Officer of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: [0000-0001-8503-8486](https://orcid.org/0000-0001-8503-8486) (Saransk, Russian Federation)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of the Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, Dr.Sci. (CS), Professor Emeritus, ORCID: [0000-0003-0268-6539](https://orcid.org/0000-0003-0268-6539) (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Professor of the Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University, Dr.Sci. (Engr.) (Irkutsk, Russian Federation)
- Arkadii A. Simdiankin** – Professor of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: [0000-0001-9761-6183](https://orcid.org/0000-0001-9761-6183) (Ryazan, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: [0000-0001-7156-9198](https://orcid.org/0000-0001-7156-9198) (Penza, Russian Federation)
- Evgeniy M. Tarasov** – Head of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University, Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: [0000-0003-2717-7343](https://orcid.org/0000-0003-2717-7343) (Samara, Russian Federation)
- Sergey Yu. Zhachkin** – Professor of the Chair of Automated Equipment for Machine Building Production, Voronezh State Technical University, Dr.Sci. (Engr.), ORCID: [0000-0002-1844-5011](https://orcid.org/0000-0002-1844-5011) (Voronezh, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Director of the Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor (Saransk, Russian Federation)



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой	190
Сысуев В. А., Савиных П. А., Казаков В. А., Сычугов Ю. В. Исследования и сравнительные испытания плющилки зерна с питающим устройством	207
Овчинников В. А., Кильмяшкин Е. А., Князьков А. С., Овчинникова А. В., Жалнин Н. А., Зыкин Е. С. Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования.....	222
Сенин П. В., Галин Д. А., Круш Л. О. Применение диагностики для исследования эксплуатационной надежности электронных систем управления двигателем автомобиля Skoda.....	235

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Динамика фракционного состава зерносоматистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна	249
Гаджиев П. И., Шестакова Е. В., Рамазанова Г. Г. Теоретическое исследование подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы.....	263

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Хорошавин В. С., Грудинин В. С. Построение квазиоптимальной по быстродействию и энергозатратам замкнутой системы управления электроустановкой	279
Ракутько Е. Н., Ракутько С. А. «Градиентный» эксперимент в светокультуре.....	295

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Меркер А. А., Рева Е. Н., Сердюк В. А. Влияние безглютеновой муки на качественные показатели теста при замесе хлебобулочного изделия	313
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.).....</i>	324
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.).....</i>	326

CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Ozherelev V. N., Nikitin V. V. The Results of the Combine Design Adaptation to Work with a Stripper Header.....	190
Sysuev V. A., Savinykh P. A., Kazakov V. A., Sychugov Yu. V. Research and Comparative Testing of a Grain Flattener with a Feeding Device.....	207
Ovchinnikov V. A., Kilmyashkin E. A., Knyazkov A. S., Ovchinnikova A. V., Zhalnin N. A., Zykin E. S. Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies.....	222
Senin P. V., Galin D. A., Krush L. O. Using Diagnostics to Research the Operational Reliability of Electronic Engine Control Systems of Skoda Car.....	235

AGRICULTURAL ENGINEERING

Zhalnin E. V., Chaplygin M. E. Dynamics of Fractional Composition of Grain-and-Straw Mass Being Threshed in the Threshing Mechanism of a Combine Harvester	249
Gadzhiev P. I., Shestakova E. V., Ramazanova G. G. Theoretical Research of the Potato Harvester Lifting Plowshare to Reduce Yield Losses and Soil Erosion.....	263

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Khoroshavin V. S., Grudinin V. S. Developing a Quasi-Optimal, in Terms of Transition Time and Energy Consumption, Closed-Loop Control System for an Electrical Installation	279
Rakutko E. N., Rakutko S. A. “Gradient” Experiment in Horticulture Lighting	295

FOOD SYSTEMS

Merker A. A., Reva E. N., Serdyuk V. A. The Influence of Gluten-Free Flour on Bakery Dough Quality.....	313
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	324
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	326

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 631.354.2

doi: 10.15507/2658-4123.032.202202.190-206

Научная статья



Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой

В. Н. Ожерельев ✉, **В. В. Никитин**
Брянский ГАУ (с. Кокино, Российская Федерация)
✉ vicoz@bk.ru

Аннотация

Введение. Снижение дробления свободного зерна рабочими органами молотилки при очесе растений на корню является актуальной научной проблемой. Цель исследования – разработать техническое решение и экспериментально подтвердить возможность осуществления предварительной сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха до поступления его в молотильную камеру зерноуборочного комбайна.

Материалы и методы. Наиболее перспективным техническим решением, позволяющим минимизировать дробление свободного зерна, является наклонная камера, содержащая решетчатое днище с продолговатыми отверстиями, под которыми смонтированы наклонные шнеки. Экспериментальные исследования были разделены на два этапа. В первой серии экспериментов в лабораторных условиях определяли оптимальные размеры отверстий решетчатого днища, обеспечивающих максимальный проход свободного зерна. Во второй серии экспериментов оценивали степень сепарации и дробления свободного зерна в реальных полевых условиях.

Результаты исследования. По результатам лабораторных исследований установлено, что максимальный проход свободного зерна сквозь отверстия решетчатого днища составляет 68,7 % при ширине его отверстий 8 мм и их длине 160 мм. По результатам полевых экспериментов установлено, что средний проход свободного зерна сквозь отверстия решетчатого днища составляет 90 %. При этом дробление зерна в наклонной камере не превышало 0,5 %, а в бункере 1,75 %. Дробление бункерного зерна находилось в пределах 5,25 % при работе комбайна без предварительной сепарации очесанного зернового вороха на решетчатом днище наклонной камеры.

Обсуждение и заключение. Предварительная сепарация свободного зерна из очесанного вороха позволяет уменьшить дробление зерна как минимум в три раза, а также снижает мощность, которая расходуется на привод молотильного аппарата, на 11–12 %.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, уборка зерна, очес, энергоемкость, степень дробления зерна

© Ожерельев В. Н., Никитин В. В., 2022



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

Благодарности: авторы благодарят анонимных рецензентов, а также выражают признательность В. Д. Игнатову (ПАО «Пензмаш») за сотрудничество и помощь в материальном обеспечении процесса исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 190–206. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>

Original article

The Results of the Combine Design Adaptation to Work with a Stripper Header

V. N. Ozherelev , V. V. Nikitin

Bryansk State Agrarian University (Kokino, Russian Federation)

 vicoz@bk.ru

Abstract

Introduction. A decrease of damaging loose grains by threshing tools when combing standing plants is an urgent scientific problem. The aim of the research is to develop a technical solution and experimentally confirm the possibility of loose grains pre-separation from the stripped grain heap before it enters the threshing chamber of the combine harvester.

Materials and Methods. The most promising technical solution to minimize the damaging of loose grain is an inclined chamber containing an oblong-hole lattice bottom, under which inclined augers are mounted. The experimental studies had two stages. In the first series of experiments, in laboratory conditions there were determined the optimal sizes of the lattice bottom holes to ensure the maximum passage of loose grains. In the second series of experiments, the degrees of separating and damaging loose grains were evaluated in real field conditions.

Results. According to the results of laboratory studies, it was found that the maximum passage of loose grains through the holes of the lattice bottom is 68.7% with the width of holes 8 mm and their length 160 mm. According to the results of field experiments, it was found that the average passage of loose grains through the holes of the lattice bottom is 90%. At the same time, damaging grains in the inclined chamber did not exceed 0.5%, and in the hopper 1.75%. Damaging grains in the bunker was in the range of 5.25% when the combine operated without pre-separation of the combed grain heap on the lattice bottom of the inclined chamber.

Discussion and Conclusion. Pre-separation of loose grains from the combed heap makes it possible to reduce damaging grains at least three times, and also reduces the power consumed by the drive of the threshing machine by 11–12%.

Keywords: harvester, grain harvesting, combing grains, energy intensity, degree of grain damaging

Acknowledgements: The authors would like to thank the anonymous reviewers, as well as to express their gratitude to V. D. Ignatov (Penzmash Public Joint Stock Company) for cooperation and assistance in material support of the research process.

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

For citation: Ozherelev V.N., Nikitin V.V. The Results of the Combine Design Adaptation to Work with a Stripper Header. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):190–206. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>

Введение

Производство зерна является одним из краеугольных камней сельского хозяйства. Вместе со всей экономикой страны отрасль пережила в конце прошлого века период институциональных преобразований. Они на первом этапе привели к значительному уменьшению как объемов производства, так и уровня его рентабельности [1]. К началу нового столетия процесс трансформации завершился и зерновое производство стало возрождаться на современных технологических и технических основах. В результате в 2020 году объем производства зерна увеличился в 1,26 раза (133,5 млн т), а его урожайность в 2 раза превысила уровень наиболее благополучной советской пятилетки (1976–1980 гг.) [2].

Очевидно, что за прошедшие десятилетия технический потенциал советского периода был полностью израсходован, и встал вопрос об обеспечении зернового производства уборочной техникой. Сначала проблема решалась за счет увеличения импорта зерноуборочных комбайнов из Европы и США при заметной деградации традиционных российских производителей. Так «Красноярский завод комбайнов» практически прекратил свою деятельность, а завод «Ростсельмаш» резко сократил объемы производства. При этом в стране появились новые предприятия, базирующиеся на поставках зарубежных комплектующих. В первую очередь это завод «Брянсксельмаш» и филиал немецкой фирмы CLAAS в Краснодарском крае. В результате в 2019 году «Ростсельмаш» произвел 3 958 комбайнов (78,8 % от общероссийского выпуска), «Брянсксельмаш» 526 (10,4 %) и «Клаас Восток» 450 (8,9 %).

Следует отметить, что комбайны нового поколения во много раз производительней своих советских предшественников. Комбайн RSM-161 может намолотить 40 т зерна за час, а за сезон убрать урожай с площади до 2 000 га. Для сравнения: комбайн предшествующего поколения Дон-1500Б мог достичь намолота только в 14 т/ч. То есть уменьшение числа комбайнов компенсируется значительным ростом их производительности.

Проблема, однако, заключается в том, что для эффективной работы высокопроизводительному комбайну требуется соответствующий агрофон. Фирма CLAAS рекомендует использовать свой самый мощный комбайн LEXION (производительностью до 60–70 т/ч) при урожайности, превышающей 70 ц/га. Понятно, что при средней урожайности российских полей 20–25 ц/га такая высокопроизводительная техника не окупается. Ряд отечественных ученых считают, что при высоком уровне дифференциации урожайности по территории страны проблема оптимизации ассортимента зерноуборочной техники может быть решена, в частности путем перехода на семь классов комбайнов с варьированием пропускной способности молотилки от 3 до 12 и выше кг/с¹ [3; 4]. Вторым вариантом адаптации комбайна к работе при минимальной урожайности можно считать ее раздельный вариант уборки с использованием валковых жаток порционного типа [5; 6].

Важнейшей проблемой при уборке зерна является энергоемкость обмола. Существенно уменьшить ее уровень (в 1,4–2,0 раза) позволяет использование технологии очеса растений на корню [7–9]. Это обусловлено тем, что, как установил еще М. А. Пустыгин,

¹ Harvesting of Mixed Crops by Axial Rotary Combines / N. V. Aldoshin [et al.] // Proceeding of 7th International Conference on Trends in Agricultural Engineering (17–20 September 2019). Prague, 2019. P. 20–25. URL: <https://2019.tae-conference.cz/proceeding/TAE2019-004-Nikolay-Aldoshin.pdf> (дата обращения: 27.01.2022).

порядка 70 % потребляемой мощности молотильный барабан расходует на деформацию и перетирание массы в молотильном зоре².

Широкое внедрение технологии очеса сдерживается, во-первых, незавершенностью оптимизационных работ по конструкции очесывателей [10–12]. Во-вторых, конструкция молотилки зерноуборочных комбайнов не приспособлена к приему и обработке очесанного зернового вороха, поскольку в молотильный зор поступает 80 и более процентов свободного зерна, которое подвергается ударному воздействию, вследствие чего резко возрастает доля дробленой продукции [13–15]. Кроме того, на это негативное технологическое воздействие расходуется значительная часть мощности, потребляемой барабаном [16; 17]. В связи с этим актуальной теоретической и практической задачей становится адаптация конструкции комбайна к обработке очесанного зернового вороха.

Цель исследования – разработать техническое решение и экспериментально подтвердить возможность осуществления предварительной сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха до поступления его в молотильную камеру зерноуборочного комбайна.

Обзор литературы

В первую очередь целесообразно зафиксировать состав очесанного зернового вороха, с которым предстоит работать молотилке зерноуборочного комбайна. По данным разных авторов, содержание в нем свободного зерна (по массе) варьируется в пределах от 60 до 85 %, оборванных колосков 10–25 % и солоmistых компонентов от 7 до 25 % [15]. С ростом частоты вращения ротора можно увеличить долю свободного зерна в ворохе, но при этом возрастает и степень его дробления [14].

При этом даже у одного исследователя на разных полях доля свободного зерна в ворохе варьировалась от 69,4 до 82,7 % [7].

Широкие пределы варьирования параметров очесанного вороха обусловлены разнообразием конструкции жатки, параметров и режимов ее рабочих органов, а также состояния агрофона. При этом в инженерной среде все еще обсуждается вопрос о выборе однобарабанной или двухбарабанной конструктивной схемы очесывателя. Тем более нет пока и единства в понимании оптимальной конструкции очесывающих гребенок. В жатке CVS фирмы Shelbourne Reynolds профиль канала между зубьями имеет форму «замочной скважины», тогда как у жатки «ОЗОН» (ПАО «Пензмаш») он имеет постоянную ширину. При этом исследования М. А. Федина подтвердили преимущества гребенки с тангенциальными каналами [10; 18].

Определенный интерес с точки зрения увеличения эффективности работы очесывателя представляет гипотеза, сформулированная В. Ю. Савиным, что очесывающей гребенке целесообразно сообщить поперечные колебания [19]. Автор предложил несколько вариантов конструктивных решений, реализующих указанный принцип [20; 21]. При соответствующей доработке конструкции и оптимизации ее параметров и режимов работы идея вибрационного воздействия на очесываемые растения может быть применена на практике.

Неоднозначными являются и сведения о степени дробления зерна. При испытании украинской жатки Славянка УАС содержание в бункере дробленого зерна не вышло за пределы 2 %, тогда как на испытании жатки ЖОНТУ-6 оно превысило 2,63 %.

Очевидно, что фракционный состав очесанного вороха подразумевает

² Пустыгин М. А. Теория и технологический расчет молотильных устройств. М. : ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. 96 с.

обязательный домолот оборванных колосьев. При этом поступление в молотильный зазор свободного зерна и значительной части мелких соломистых примесей с технологической точки зрения не только лишено смысла, но и негативно отражается на сохранности зерновок. Следовательно, целесообразно внести коррективы в технологический процесс зерноуборочного комбайна, удалив из вороха, поступающего на домолот, большую часть свободных зерен.

Решение указанной проблемы имеет несколько альтернативных направлений, в каждом из которых присутствуют варианты конструктивного исполнения перспективной технологической идеи. К первому и самому многочисленному направлению могут быть отнесены конструктивные решения, в которых свободное зерно выделяется из вороха непосредственно в наклонной камере и выводится за ее пределы. Что касается способа сепарации, то он в большинстве случаев предполагает оборудование наклонной камеры решетчатым днищем. Подачу прохода на транспортную доску предполагается осуществлять специальным скребковым транспортером. Для этого в наклонной камере монтируется дополнительное днище [22]. В качестве варианта исполнения вместо скребкового транспортера могут быть использованы наклонные шнеки [23; 24].

Вторая группа сепарирующих устройств так же предполагает их размещение в наклонной камере. При этом вслед за очесывающим барабаном должен быть смонтирован домолочивающий барабан, сквозь решетку подбарабанья которого зерна будут просыпаться вниз и отводиться [25]. Существует несколько аналогичных конструкций, но для всех характерен общий недостаток, заключающийся в том, что слишком большая масса перегружает передний мост комбайна.

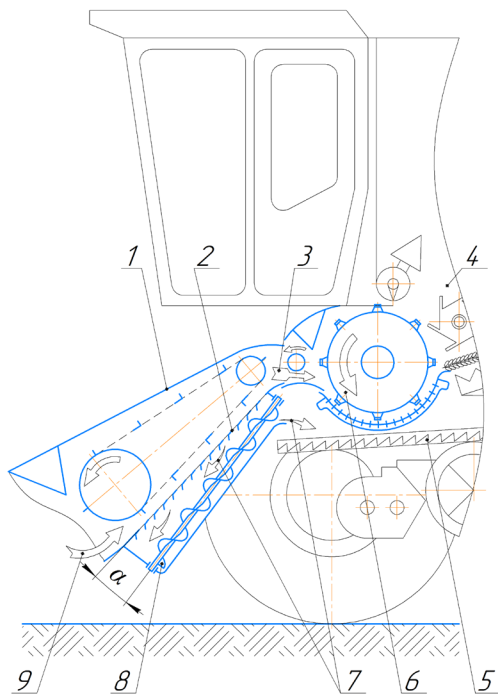
Кроме того, необходимо подать отсепарированное зерно в систему очистки, что существенно усложняет конструкцию по сравнению с решетчатым днищем. При этом не исключается негативное воздействие домолочивающего барабана на свободное зерно, то есть основная технологическая цель модернизации конструкции при этом не может быть достигнута в принципе.

Третья группа технических решений предполагает размещение сепарирующего устройства, предназначенного для выделения из очесанного вороха свободного зерна, непосредственно перед молотильным барабаном или вместо него [26; 27]. С точки зрения совершенства технологического процесса размещение сепарирующего устройства перед барабаном предпочтительнее. Для этого необходимо радикально перекомпоновать комбайн, существенно отодвинув назад барабан, укоротив при этом соломотряс. Что касается замены барабана на аналогичный по технологическому назначению рабочий орган: характер его воздействия на свободное зерно изменится несущественно, поэтому такой вариант представляется менее перспективным.

Материалы и методы

Выявленное при анализе литературы разнообразие подходов к решению проблемы предварительной сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха предопределило структуру дальнейших исследований. По совокупности конструктивных и экономических факторов выбор был остановлен на выделении из вороха 9 свободного зерна 7 на решетчатом днище 2 наклонной камеры 1 и подаче его на транспортную доску 5 комбайна 4 наклонными шнеками 8 (рис. 1). В результате на первом этапе проблема была ограничена оптимизацией параметров решетчатого днища и оценкой качественных показателей процесса сепарации.

В первую очередь необходимо было определить оптимальные размеры сепарирующих отверстий, для чего следовало сформулировать теоретическую модель процесса. Экспертная оценка его характера дала два альтернативных варианта: продолговатые отверстия могут быть сориентированы либо вдоль направления движения скребков транспортера, либо поперек. Исходя из теории решетчатых зерноочистительных машин, выбор был остановлен на продольной ориентации отверстий [28–31].



Р и с. 1. Принципиальная схема модернизации наклонной камеры: 1 – наклонная камера; 2 – решетчатое днище; 3 – колоски; 4 – комбайн; 5 – транспортная доска; 6 – молотильный барабан; 7 – свободное зерно; 8 – шнек; 9 – очесанный зерновой ворох

Fig. 1. Schematic diagram of the inclined chamber modernization: 1 – inclined chamber; 2 – lattice bottom; 3 – spikelets; 4 – combine harvester; 5 – transport board; 6 – threshing drum; 7 – loose grains; 8 – auger; 9 – combed grain heap

Следуя аналогии с теорией прохождения зерна сквозь продолговатое отверстие решета зерноочистительной машины, была принята гипотеза о том, что движение свободного зерна представляет собой полет тела, брошенного под углом к горизонту, что позволило вычислить минимальную длину отверстия, необходимого для гарантированного прохода сквозь него отдельного зерна. Однако в результате установочных экспериментов принятая гипотеза не нашла своего подтверждения, в связи с чем модель процесса была модернизирована с учетом того, что свободные зерна перемещаются внутри слоя вороха. В связи с этим они не имеют возможности для свободного полета.

Модернизированная гипотеза заключалась в том, что перемещаемые скребками поперечные (локальные) объемы вороха треугольного поперечного сечения при достижении нижней кромки отверстия начинают соскальзывать в него слоями толщиной в одну зерновку под углом внутреннего трения к горизонту. При достижении верхней кромки продолговатого отверстия соскальзывание прекращается и возобновляется вновь после прохода перемычки между отверстиями. Полученное на основе этой гипотезы дифференциальное уравнение движения слоя очесанного вороха позволило спрогнозировать приемлемую длину продолговатого отверстия, которая и была принята за основу при планировании эксперимента по оптимизации параметров решетчатого днища.

Оптимизационный эксперимент был осуществлен в лаборатории кафедры «Технические системы в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве» Брянского ГАУ. Лабораторная установка была изготовлена на основе колосового элеватора зерноуборочного комбайна КЗС-10К. Нижняя

стенка кожуха элеватора была удалена, а на ее место установили соответствующее экспериментальное сменное решето длиной 920 мм с продолговатыми отверстиями. Под решетом устанавливали четыре емкости, равномерно распределив их по его длине. Емкости улавливали весь ворох, прошедший сквозь отверстия. Элеватор был снабжен электроприводом с бесступенчатым регулированием скорости движения скребков (посредством частотного преобразователя Веспер Е2-8300) и угла его наклона. Таким образом, лабораторная установка осуществляла полную имитацию работы наклонной камеры зерноуборочного комбайна.

Процесс осуществлялся следующим образом. После запуска скребкового транспортера в приемную часть установки засыпали очесанный зерновой ворох с содержанием свободного зерна порядка 80 %. При этом время засыпки вороха соответствовало (в пересчете на ширину наклонной камеры) характерной для комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10» подаче (10 кг/с). После завершения каждой повторности опыта взвешивали содержимое четырех емкостей с проходом вороха и емкости с его сходом. В качестве исследуемого материала использовался очесанный ворох озимой пшеницы сорта Московская 56, характерного для Брянской

области и ряда других регионов средней полосы России.

Лабораторный эксперимент планировался как полнофакторный и состоял из двух серий, поскольку в результате первой серии выйти на зону оптимума не удалось. Условия планирования лабораторного эксперимента приведены в таблице 1.

Поскольку эксперимент был спланирован с трехкратной повторностью каждого варианта опыта (тип плана 3^2), то в каждой из серий было реализовано по 27 замеров (таблица 2).

После лабораторных экспериментов была проведена модернизация конструкции наклонной камеры очесывающей жатки «ОЗОН» производства ПАО «Пензмаш». На основе модернизированного оборудования был проведен полевой эксперимент, целью которого была оценка степени сепарации свободного зерна в реальных полевых условиях. Кроме того, необходимо было установить разницу в степени дробления зерна в бункере, прошедшего через все рабочие органы молотилки, и зерна, изъятая непосредственно из наклонной камеры.

Для этого с наклонной камеры были демонтированы наклонные шнеки вместе с их кожухами, а вместо них был смонтирован мягкий контейнер большой емкости.

Т а б л и ц а 1
Table 1

Условия планирования эксперимента
Experimental planning conditions

Факторы / Factors	Уровни варьирования / Variation grades		
	-1	0	+1
Серия 1 / Series 1			
Длина отверстия l , мм / Hole length l , mm	80	120	160
Ширина отверстия b , мм / Hole width b , mm	8	10	12
Серия 2 / Series 2			
Длина отверстия l , мм / Hole length l , mm	120	160	200
Ширина отверстия b , мм / Hole width b , mm	6	8	10

Матрица планирования второй серии эксперимента
Planning matrix of the experiment second series

Номер опыта / Experience Number	Серия 1 / Series 1		Серия 2 / Series 2	
	<i>l</i> , мм / <i>l</i> , mm	<i>b</i> , мм / <i>b</i> , mm	<i>l</i> , мм / <i>l</i> , mm	<i>b</i> , мм / <i>b</i> , mm
1	80	8	120	6
2	80	10	120	8
3	80	12	120	10
4	120	8	160	6
5	120	10	160	8
6	120	12	160	10
7	160	8	200	6
8	160	10	200	8
9	160	12	200	10

При движении комбайна большая часть зерна и наиболее мелкие соломистые фракции накапливались в мягком контейнере, а оборванные очесывателем колоски и часть соломин поступали в молотильный зазор. Жатка была навешена на зерноуборочный комбайн «Нива-Эффект».

Испытания проводили в 2021 году на опытном поле учебно-опытного хозяйства Брянского ГАУ (с. Кокино, Брянская обл.) на озимой пшенице сорта Московская 56. Комбайн перемещался по учетной делянке с постоянной скоростью 8 км/ч при частоте вращения очесывающего барабана 485 мин⁻¹. После очеса зерноуборочным комбайном учетной делянки длиной 50 м осуществлялась его полная остановка. После этого определяли массу зерна, поступившего в бункер, и вороха, накопленного в мягком контейнере, с последующим разбором его по фракционному составу. В частности, устанавливали долю дробленого зерна в бункере, травмированного рабочими

органами молотилки, и в ворохе, прошедшем сквозь отверстия решетчатого днища и накопленном в мягком контейнере. Каждый вариант опыта был проведен в трехкратной повторности. Таким образом, всего были учтены и обработаны результаты шести экспериментов. Для их обработки использованы стандартные программы Excel, STATISTICA 10 и Matcad.

Полеглость растений, а также суммарные потери урожая за комбайном определяли по ГОСТу³.

Результаты исследования

В качестве критерия оптимизации и отклика для регрессионной модели был принят проход свободного зерна сквозь отверстия сепарирующей решетки. Характер взаимодействия факторов второй серии лабораторных экспериментов представлен на рисунке 2 и формулой (1) ($R^2 = 0,934$):

$$\begin{aligned}
 P_{\text{зеп}} = & -110,73 + 0,199 \cdot l + 37,197 \cdot b - \\
 & -1,926 \cdot b^2 - 0,0229 \cdot l \cdot b, \quad (1)
 \end{aligned}$$

³ ГОСТ 28301-2015. Комбайны зерноуборочные. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2020. 46 с.

где $P_{з\text{ер}}$ – проход свободного зерна сквозь отверстия сепарирующей решетки, %; l – длина отверстия, мм; b – ширина отверстия, мм.

В зоне оптимума, локализовавшейся вблизи параметров $l = 160$ мм и $b = 8$ мм, проход свободного зерна достиг 68,7 %. При этом с высокой степенью адекватности ($R^2 = 0,982$) была установлена линейная зависимость между величиной прохода и длиной поверхности решетки:

$$C_{з\text{ер}} = -80,424 \cdot L + 95,045, \quad (2)$$

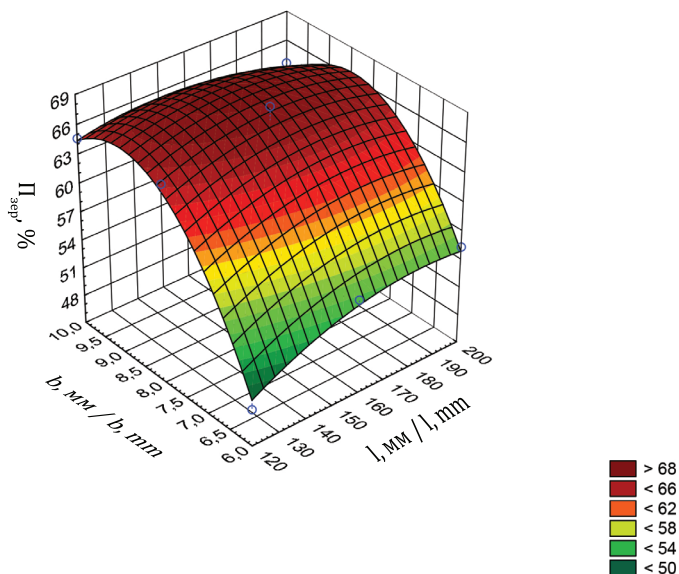
где $C_{з\text{ер}}$ – сход свободного зерна сквозь отверстия сепарирующей решетки, %; L – длина сепарирующей решетки, м.

Экстраполяция полученного тренда (2) позволила сделать вывод о том, что практически полное выделение из очесанного вороха свободного зерна возможно при длине сепарирующей поверхности $L = 1,18$ м. У серийного

комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10» днище наклонной камеры имеет длину порядка 1,3 м. Следовательно, осуществление практически стопроцентной сепарации свободного зерна в наклонной камере зерноуборочного комбайна технически возможно.

Практическая реализация полученных результатов была осуществлена на базе очесывающей жатки «ОЗОН» в агрегате с комбайном «Нива-Эффект» (рис. 3).

По результатам серии экспериментов установлено, что средний проход свободного зерна сквозь отверстия решетчатого днища составляет 90 %. Отсутствие стопроцентного результата обусловлено непроницаемостью стенок контейнера для потока воздуха, генерируемого ротором очесывателя, что нарушает отвод пыли, которая блокирует значительную часть живого сечения отверстий решетчатого днища. При этом доля дробленого зерна



Р и с. 2. Поверхность отклика для второй серии опытов при взаимодействии факторов: длина и ширина отверстий решетчатой поверхности

Fig. 2. The response surface for the second series of experiments with the interaction of factors: the length and the width of the holes of the lattice surface

в ворохе, накопленном в мягком контейнере и прошедшем сквозь отверстия в решетчатом днище, не превышала 0,5 %, тогда как в бункере она увеличилась до 1,75 %. Состав очесанного зернового вороха, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища и накопленного в мягком контейнере, был следующим: свободное зерно 76 %, солома 23,3 %, необмолоченные колосья 0,2 % и солома 0,5 %.

При работе комбайна без предварительной сепарации очесанного зернового вороха на решетчатом днище наклонной камеры дробление бункерного зерна превышало агротехнические требования, поскольку достигало 5,25 %. Суммарные потери за комбайном во всех вариантах опытов не превышали 2 % при средней полеглости растений 11,21 %.

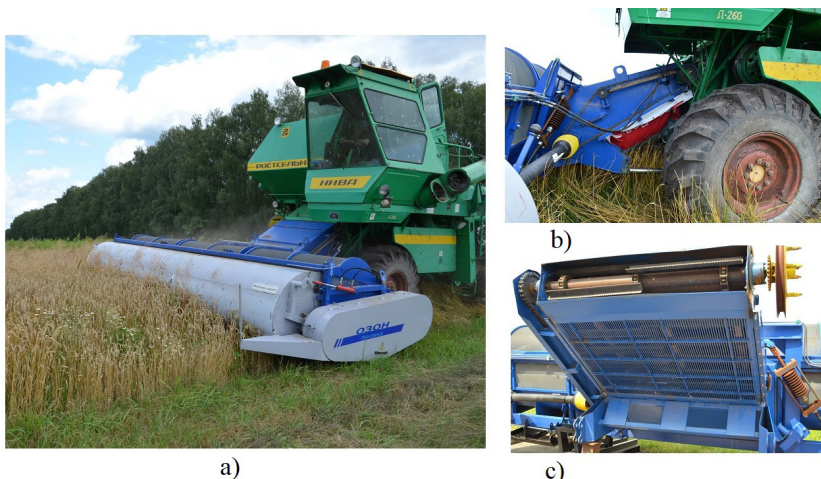
Обсуждение и заключение

Главный вывод, который следует из анализа приведенных выше результатов, заключается в том, что предварительное выделение из очесанного зернового вороха свободного зерна до его поступления в молотильный зазор технически

осуществимо. Более того, оно возможно в наклонной камере очесывающей жатки без внесения существенных корректив в конструкцию самого комбайна. Последнее обстоятельство важно в тех зонах страны, где зерноуборочный комбайн предполагается использовать и для уборки подсолнечника, кукурузы, а также других культур, уборка которых очесом затруднена или невозможна.

Одним из последствий расширения функции наклонной камеры за счет сепарации свободного зерна является некоторое увеличение ее массы. Выполненные предварительно расчеты свидетельствуют о том, что перегрузка переднего моста и недогрузка моста управляемых колес на данном этапе присутствуют, но не несут катастрофического характера [32]. Тем не менее при дальнейшей модернизации машин целесообразно учесть это обстоятельство и целенаправленно осуществить соответствующее перераспределение веса между мостами комбайна.

В тех зонах, где предполагается использовать комбайн исключительно

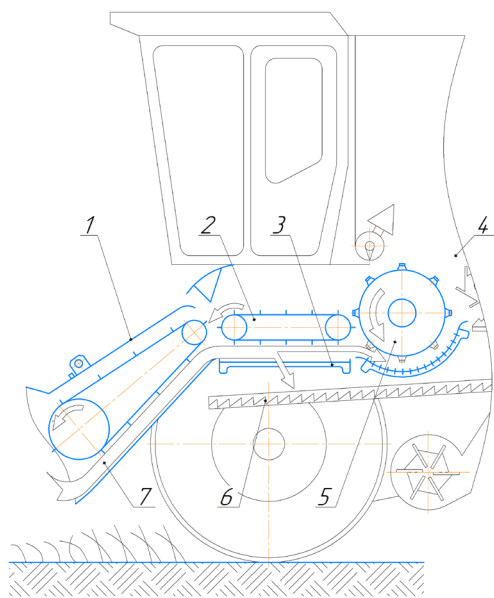


Р и с. 3. Экспериментальное оборудование при проведении полевых исследований:
а) общий вид зерноуборочного комбайна; б) мягкий контейнер;
с) решетчатое днище наклонной камеры

F i g. 3. Experimental equipment for field research: a) general view of the combine harvester;
b) soft container; c) lattice bottom of the inclined chamber

в агрегате с очесывателем, ориентация на размещение сепарирующего устройства непосредственно перед барабаном может быть оправданной. При этом барабан необходимо переместить назад, а соломотряс укоротить за ненадобностью. Наряду с рассмотренными в литературном обзоре техническими решениями, реализующими этот принцип, перспективными могут быть и альтернативные варианты конструкции [33].

Перспективным можно считать и размещение перед барабаном 5 состоящей из продольных пластин сепарирующей решетки 3 с расположенным над ней дополнительным скребковым транспортером 2 (рис. 4).



Р и с. 4. Размещение сепарирующей решетки непосредственно перед барабаном:

- 1 – наклонная камера; 2 – транспортер скребковый; 3 – сепарирующая решетка;
- 4 – комбайн; 5 – барабан молотильный;
- 6 – транспортная доска; 7 – очесанный зерновой ворох

Fig. 4. Placement of the separating grate directly in front of the drum: 1 – inclined chamber; 2 – scraper conveyor; 3 – separating grate; 4 – combine harvester; 5 – threshing drum; 6 – transport board; 7 – combed grain heap

Ее перевод из наклонного положения (в наклонной камере) в горизонтальное (перед барабаном) должен существенно увеличить сепарирующую способность живого сечения отверстий. Этому может способствовать и ликвидация характерных для решетчатого днища наклонной камеры перегородок между отверстиями, поскольку процесс скольжения слоев вороха становится непрерывным на всей длине решетки 3 [34]. Перевод сепарирующей решетки 3 в горизонтальное положение сокращает необходимую длину поверхности сепарации, примерно, до одного метра, что уменьшает проблемы, связанные с необходимостью перекомпоновки комбайна.

Принято считать, что при уборке зерновых культур очесом на корню энергоёмкость процесса заметно уменьшается. В частности, расход топлива снижается на 45 % [7]. Модернизация формы очесывающих гребенок позволяет увеличить эффект еще на 28 % [10]. При этом отсутствуют сведения об экономии энергозатрат вследствие осуществления предварительной сепарации очесанного вороха в наклонной камере комбайна. На данном этапе исследований мы ограничились аналитической оценкой этого эффекта.

Источником экономии энергозатрат являются затраты на деформацию (перетирацию) массы и на сообщение ей дополнительной кинетической энергии. В результате установлено, что, с учетом КПД привода, потребность в мощности на привод молотильного барабана должна уменьшиться на 10,2 кВт (для комбайна типа КЗС-10К). При этом дополнительные затраты мощности на привод наклонных шнеков не превышают 1 кВт.

Таким образом, предварительная сепарация свободного зерна из очесанного вороха в три раза уменьшает дробление зерна, а также снижает

мощность, расходуемую на привод модернизации зерноуборочного ком-
молотильного аппарата, на 11–12 %. байна до его массового внедрения
Следовательно, дальнейшие работы в производство имеют хорошую пер-
по доведению указанного направления спективу окупаемости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шибалкин А. Е. Динамика производства зерна в России: объемные и структурные изменения // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2019. № 7. С. 44–48. doi: <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2019-0-7-44-48>

2. Single- and Multispecies Farming Ecosystems in Field Forage Production / N. M. Belous [et al.] // Natural Volatiles and Essential Oils. 2021. Vol. 8, Issue 4. P. 7745–7764.

3. Жалнин Э. В., Ценч Ю. С., Пьянов В. С. Методика анализа технического уровня зерноуборочных комбайнов по функциональным и конструктивным параметрам // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 2. С. 4–8. doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-2-4-8>

4. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan / V. L. Astafyev [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 3. P. 46–51. URL: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (дата обращения: 27.01.2022).

5. On the Substantiation of the Technological Scheme of the Combine Harvester with the Stationary Process of Threshing Bread Mass [Электронный ресурс] / A. S. Ovchinnikov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness, TSIA 2019 (21–22 October 2019). Vol. 488. Stavropol, 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012057>

6. Загрузка комбайнов, требования к хлебным валкам и воздействие уборочной техники на агроландшафты как предпосылки разработки и применения порционной технологии уборки / И. Н. Глушков [и др.] // Известия Международной академии аграрного образования. 2021. № 57. С. 36–41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47467816> (дата обращения: 27.01.2022).

7. Adaptation of Threshing Devices to Physical and Mechanical Characteristics of Harvested Crops / Yu. F. Lachuga // Russian Agricultural Sciences. 2020. Vol. 46, Issue 2. P. 198–201. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>

8. Lovchikov A. P., Ognev I. I. Theoretical Background for the Development of Stationary Process of Grain Mass Threshing with a Combine Harvester [Электронный ресурс] // E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2020). Vol. 193. Sevastopol, 2020. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019301004>

9. Increase in Soil Moisture Reserves Due to the Formation of High Stubble Residues for the Accumulation of Snow Precipitation [Электронный ресурс] / M. Konstantinov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference “Earth Science” (8–10 December 2020). Vol. 666. Vladivostok, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>

10. Результаты лабораторных исследований по определению оптимальных конструктивных и режимных параметров ротора / М. А. Федин [и др.] // Нива Поволжья. 2018. № 4. С. 169–174. URL: <https://clck.ru/enmfi> (дата обращения: 27.01.2022).

11. Buryanov A. I., Chervyakov I. V., Kolinko A. A. Strength Testing of Stripping Cylinder’s Tooth // INMATEH – Agricultural Engineering. 2021. Vol. 65, Issue 3. P. 67–72.

12. Development of a Method to Control Threshing Process Based on Properties of Harvested Crop Variety and External Factors [Электронный ресурс] / A. V. Alabushev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (17–18 October 2019). Voronezh, 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012005>

13. Buryanov A. I., Chervyakov I. V. Using Combines for Cleaning Grain Crops by Non-Traditional Technologies // INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 27–32.
14. Савин В. Ю. Зависимость степени дробления зерна пшеницы от частоты вращения очесывающего устройства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3. С. 98–102. doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>
15. Perspectives of Grain Pile Separation Before It Enters the Thresh-ER / V. Ozherelyev [et al.] // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7, Issue 2.13. P. 114–116. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>
16. Chaplygin M. E., Tronev S. V., Davydova S. A. Soybean Harvesting Using Current Dedicated Headers and Adapters [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production (27–28 August 2020). Vol. 659. Rostov Region, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012014>
17. Chaplygin M. E., Pekhalskiy I. A., Tronev S. V. The Choice of Combine Harvesters and Their Adapters for the Conditions of Northern Kazakhstan // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 3. P. 74–76.
18. Съёмная гребенка очесывающего оборудования : патент 2646054 Российская Федерация / Кухарев О. Н., Семов И. Н., Федин М. А. № 2017111437 ; заявл. 04.04.2017; опубл. 01.03.2018. 11 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37365086> (дата обращения: 30.01.2022).
19. Савин В. Ю. Исследование очесывающего аппарата устройства для уборки зерновых культур как колебательной системы // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 403–413. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>
20. Очесывающий аппарат : патент 2726110 Российская Федерация / Савин В. Ю. № 2019117319 ; заявл. 04.06.2019 ; опубл. 09.07.2020. 4 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43905335> (дата обращения: 30.01.2022).
21. Очесывающий аппарат : патент 2751846 Российская Федерация / Савин В. Ю. № 2020128369 ; заявл. 25.08.2020 ; опубл. 19.07.2021. 4 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46476751> (дата обращения: 30.01.2022).
22. Наклонная камера зерноуборочного комбайна : патент 1687078 СССР / Дементьев А. В. [и др.]. № 4689013/15 ; заявл. 12.05.1989 ; опубл. 30.10.1991. 5 с. URL: <https://patents.su/4-1687078-naklonnaya-kamera-zernouborochnogo-kombajna.html> (дата обращения: 30.01.2022).
23. Наклонная камера зерноуборочного комбайна : патент 2577892 Российская Федерация / Ожерельев В. Н., Никитин В. В. № 2014145875/13 ; заявл. 14.11.2014 ; опубл. 20.03.2016. 4 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37388291> (дата обращения: 30.01.2022).
24. Ozherelyev V. N., Nikitin V. V., Komogortsev V. F. Comparison of Different Methods for Preliminary Separation of Free Grain When Hatching Standing Plants [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1079. 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062088>
25. Зерноуборочный комбайн : патент 2680666 Российская Федерация / Шабанов Н. П., Хабрат Н. И., Умеров Э. Д. № 2016149302 ; заявл. 14.12.2016 ; опубл. 25.02.2019. 4 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41019193> (дата обращения: 30.01.2022).
26. Комбайн для уборки зерновых культур на корню : патент 1766310 СССР / Данченко Н. Н. [и др.]. № 4670394/15 ; заявл. 06.02.1989 ; опубл. 07.10.1992. 5 с. URL: <https://patenton.ru/patent/SU1766310A1> (дата обращения: 30.01.2022).
27. Зерноуборочный комбайн с очесывающей жаткой : патент 2744619 Российская Федерация / Ряднов А. И., Федорова О. А. № 2020120743 ; заявл. 16.06.2020 ; опубл. 12.03.2021. 4 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45806659> (дата обращения: 30.01.2022).
28. Тишанинов К. Н. Обоснование конструктивно-технологической схемы решетного стана // Наука в центральной России. 2021. № 4. С. 13–17. doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-4-13-17>
29. Obtaining High-Quality Grain through the Use of Fractional Technology for Its Cleaning [Электронный ресурс] / V. I. Orobinsky [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (26–29 February 2020). Vol. 640. Voronezh, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022046>

30. Orobinsky V. I., Gulevsky V. A., Gievsky A. M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture. Vol. 723. Smolensk, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>

31. Ways to Reduce Injury to Seeds by the Harvester's Final Threshing Device [Электронный ресурс] / V. I. Orobinsky [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture. Vol. 723. Smolensk, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032014>

32. Ожерельев В. Н., Никитин В. В., Федин М. А. Влияние предварительной сепарации свободного зерна на устойчивость комбайна с очесывающей жаткой // Сельский механизатор. 2020. № 1. С. 4–6. URL: http://libryansk.ru/files/projectimage/agro/text/ozherelev_sm_2020_01.pdf (дата обращения: 30.01.2022).

33. Зерноуборочный комбайн : патент 2685735 Российская Федерация / Ожерельев В. Н. [и др.]. № 2018126059 ; заявл. 13.07.2018 ; опубл. 23.04.2019. 4 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38145296> (дата обращения: 30.01.2022).

34. Зерноуборочный комбайн : патент 2756602 Российская Федерация / Ожерельев В. Н. [и др.]. № 2020137033 ; заявл. 10.11.2020 ; опубл. 04.10.2021. 5 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47120989> (дата обращения: 30.01.2022).

Поступила 02.02.2022; одобрена после рецензирования 21.03.2022; принята к публикации 11.04.2022

Об авторах:

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

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

Заявленный вклад авторов:

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shibalkin A.E. Dynamics of Grain Production in Russia: Volume and Structural Changes. *Economy of Agricultural and Processing Enterprises*. 2019;(7):44–48. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2019-0-7-44-48>

2. Belous N.M., Belchenko S.A., Dronov A.V., Torikov V.E. Single- and Multispecies Farming Ecosystems in Field Forage Production. *Natural Volatiles and Essential Oils*. 2021;8(4):7745–7764.

3. Zhalnin E.V., Tsench Yu.S., Pyanov V.S. Analysis Method of Combine Harvesters Technical Level by Functional and Structural Parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018;12(2):4–8. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-2-4-8>

4. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., et al. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46–51. Available at: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (accessed 27.01.2022).

5. Ovchinnikov A.S., Lovchikov A.P., Ryadnov A.I., et al. On the Substantiation of the Technological Scheme of the Combine Harvester with the Stationary Process of Threshing Bread Mass. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness, TSIA 2019 (21–22 October 2019). Vol. 488. Stavropol; 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012057>

6. Glushkov I.N., Konstantinov M.M., Gerasimenko I.V., et al. Loading of Harvesters, Requirements for the Stems Grouped after Mowing and Impact Harvesting Equipment for Agricultural Landscapes as Prerequisites Development and Application of Batch Technology for Harvesting Grain Crops. *Proceedings of the International Academy of Agrarian Education*. 2021;(57):36–41. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47467816> (accessed 27.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

7. Lachuga Yu.F., Buryanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of Threshing Devices to Physical and Mechanical Characteristics of Harvested Crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020; 46(2):198–201. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>

8. Lovchikov A.P., Ognev I.I. Theoretical Background for the Development of Stationary Process of Grain Mass Threshing with a Combine Harvester. In: E3S Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2020). Vol. 193. Sevastopol; 2020. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019301004>

9. Konstantinov M., Glushkov I., Mukhamedov V., Lovchikov A. Increase in Soil Moisture Reserves Due to the Formation of High Stubble Residues for the Accumulation of Snow Precipitation. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference “Earth Science” (8–10 December 2020). Vol. 666. Vladivostok; 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>

10. Fedin M.A., Kukharev O.N., Kukhmazov K.Z., et al. The Results of Laboratory Tests on the Determination of the Optimal Constructive and Operating Parameters of Rotor. *Cornfield of Volga Region*. 2018;(4):169–174. Available at: <https://cclk.ru/enmfi> (accessed 27.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

11. Buryanov A.I., Chervyakov I.V., Kolinko A.A. Strength Testing of Stripping Cylinder’s Tooth. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2021;65(3):67–72.

12. Alabushev A.V., Buryanov A.I., Pakhomov V.I., et al. Development of a Method to Control Threshing Process Based on Properties of Harvested Crop Variety and External Factors. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (17–18 October 2019). Voronezh; 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012005>

13. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using Combines for Cleaning Grain Crops by Non-Traditional Technologies. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27–32.

14. Savin V.Yu. [Dependence of the Degree of Wheat Grain Crushing on the Speed of the Comber]. *Voronezh State Agrarian University Bulletin*. 2018;(3):98–102. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>

15. Ozherelyev V., Nikitin V., Belous N., Torikov V. Perspectives of Grain Pile Separation Before It Enters the Thresh-ER. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018;7(2.13):114–116. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>

16. Chaplygin M.E., Tronev S.V., Davydova S.A. Soybean Harvesting Using Current Dedicated Headers and Adapters. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference

on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production (27–28 August 2020). Vol. 659. Rostov Region; 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012014>

17. Chaplygin M.E., Pekhalskiy I.A., Tronev S.V. The Choice of Combine Harvesters and Their Adapters for the Conditions of Northern Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):74–76.

18. Kukharev O.N., Semov I.N., Fedin M.A. [Removable Comb of Combing Equipment]. Patent 2,646,054 Russian Federation. 2018 March 1. 11 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37365086> (accessed 30.01.2022). (In Russ.)

19. Savin V.Yu. Study of a Stripper Header for Grain Harvesting as a Vibrating System. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(3):403–413. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>

20. Savin V.Yu. Combing Device. Patent 2,726,110 Russian Federation. 2020 July 9. 4 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43905335> (accessed 30.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

21. Savin V.Yu. Combing Device. Patent 2,751,846 Russian Federation. 2021 July 19. 4 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46476751> (accessed 30.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

22. Dyemyentyev A.V., Skorik V.I., Pastukhov B.K. [Inclined Chamber of a Combine Harvester]. Patent 1,687,078 USSR. 1991 October 30. 5 p. Available at: <https://patentsu.4-1687078-naklonnaya-kamera-zernouborochnogo-kombajjna.html> (accessed 30.01.2022). (In Russ.)

23. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. [Inclined Chamber of a Combine Harvester]. Patent 2,577,892 Russian Federation. 2016 March 20. 4 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37388291> (accessed 30.01.2022). (In Russ.)

24. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Komogortsev V.F. Comparison of Different Methods for Preliminary Separation of Free Grain When Hatcheling Standing Plants. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1079. 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062088>

25. Shabanov N.P., Khabrat N.I., Umerov E.D. Combine Harvester. Patent 2,680,666 Russian Federation. 2019 February 25. 4 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41019193> (accessed 30.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

26. Danchenko N.N., Shkinder V.N., Ablogin N.N., et al. [Combine Harvester for Standing Grain Crops]. Patent 1,766,310 USSR. 1992 October 7. 5 p. Available at: <https://patenton.ru/patent/SU1766310A1> (accessed 30.01.2022). (In Russ.)

27. Ryadnov A.I., Fedorova O.A. Grain Harvester with Stripper Header. Patent 2,744,619 Russian Federation. 2021 March 12. 4 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45806659> (accessed 30.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

28. Tishaninov K.N. Justification of the Design and Technological Scheme Grating Mill. *Science in the Central Russia*. 2021;(4):13–17. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-4-13-17>

29. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., et al. Obtaining High-Quality Grain through the Use of Fractional Technology for Its Cleaning. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (26–29 February 2020). Vol. 640. Voronezh; 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022046>

30. Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture. Vol. 723. Smolensk; 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>

31. Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Baskakov I.V., Podorvanov D.A. Ways to Reduce Injury to Seeds by the Harvester's Final Threshing Device. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture. Vol. 723. Smolensk; 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032014>

32. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Fedin M.A. [Influence of Free Grain Pre-Separation on the Stability of a Combine Harvester with a Combing Header]. *Rural Mechanic*. 2020;(1):4–6. Available at: http://libryansk.ru/files/projectimage/agro/text/ozherelev_sm_2020_01.pdf (accessed 30.01.2022). (In Russ.)

33. Ozherelev V.N., Zhalnin E.V., Ignatov V.D., et al. Combine Harvester. 2019 April 23. 4 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38145296> (accessed 30.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

34. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Ozhereleva M.V., Ozherelev P.V. Combine Harvester. 2021 October 4. 5 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47120989> (accessed 30.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 02.02.2022; approved after reviewing 21.03.2022; accepted for publication 11.04.2022

About the authors:

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

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

Contribution of the authors:

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

V. V. Nikitin – analysis of literary data, preparation of the initial version of the text and finalization of the text, conducting experiments and processing the results.

All authors have read and approved the final manuscript.



Исследования и сравнительные испытания плющилки зерна с питающим устройством

В. А. Сысуев, П. А. Савиных ✉, **В. А. Казаков, Ю. В. Сычугов**
*Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого (г. Киров, Российская Федерация)*
✉ peter.savinyh@mail.ru

Аннотация

Введение. В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований технологического процесса плющилки зерна с питающим устройством ПЗ-1М. Работа выполнена на базе ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в период 2011–2019 гг. Цель исследования – разработка схемы питающего устройства к плющилке зерна, определение рациональных параметров его рабочего органа (питающего вальца) и испытания усовершенствованной плющилки.

Материалы и методы. Предложена конструктивно-технологическая схема плющилки с питающим устройством, новизна которой подтверждена патентами № 2628297 и 2557780. Разработана структурная схема плющилки с питающим устройством, включающим активный рабочий орган – питающий валец с лопастями. Проведены теоретические исследования движения зерновки по лопастям вальца питающего устройства, которые определили закономерности движения зерна в зависимости от величин параметров вальца.

Результаты исследования. Установлено, что при величине внутреннего радиуса питающего вальца 0,045 м и больше все зерно сходит с лопасти в подводящий канал и через него на плющение под требуемым углом выхода, равным 60°, при частоте вращения вальца не меньше 400 мин⁻¹ и величине коэффициента трения зерна о лопасть вальца меньше 0,4. При соблюдении данных параметров питающий вал и устройство эффективны. С учетом результатов исследований разработана конструкторская документация и изготовлена плющилка ПЗ-1М, включающая питающее устройство. Проведены ведомственные и сравнительные испытания плющилки, которые показали высокую эффективность ее применения: машина надежно и качественно выполняет технологический процесс плющения зерна.

Обсуждение и заключение. Применение в конструкции плющилки питающего устройства в 2,08 раза повышает производительность плющения при снижении энергоемкости процесса в 1,6 раза; годовой экономической эффект от применения плющилки с питающим устройством ПЗ-1М, по сравнению с аналогом, составляет 67 583 руб. при уровне интенсификации 49 %.

Ключевые слова: плющение, производительность, технология, корм, эффективность, зерно, питающее устройство

Финансирование: исследование выполнено в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в рамках научной программы № АААА-А19-119042290137-1 на 2013–2023 гг.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Исследования и сравнительные испытания плющилки зерна с питающим устройством / В. А. Сысуюв [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 207–221. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.207-221>

Original article

Research and Comparative Testing of a Grain Flattener with a Feeding Device

V. A. Sysuev, P. A. Savinykh ✉, V. A. Kazakov, Yu. V. Sychugov

*Federal Agricultural Research Center of the North-East
Named after N. V. Rudnitsky (Kirov, Russian Federation)*

✉ peter.savinykh@mail.ru

Abstract

Introduction. The article presents the results of experimental and theoretical research of technological process of the PZ-1M grain flattener with a feeding device. The research was carried out at the Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky in 2011–2019. The purpose of the research is to design a feeder scheme for the grain flattener, determine rational parameters of its working body (feed roller) and test the improved grain flattener.

Materials and Methods. A constructive and technological scheme of the grain flattener with a feeding device is proposed, the novelty of which is confirmed by patents Nos. 2628297 and 2557780. The structural scheme of grain flattener with a feeding device comprising an active working body – a feeding roller with blades is developed. There was carried out theoretical research of the grain motion along the feeder roller blades to determine the patterns of grain motion depending on the values of the roller parameters.

Results. It is established that with the size of the feed roller inner radius 0.045 m and more all the grain passes down from the roller blade into the feed channel and through it for flattening at the required exit angle of 60°, roller speed of not less than 400 min⁻¹ and the value of the coefficient of the grain friction on the roller blade less than 0.4. When these parameters are observed, the feeding roller and the device are effective. Taking into account the results of researches, we have developed the design documentation and produced the PZ-1M grain flattener comprising a feeder. Departmental and comparative tests of the flattener were conducted, which showed high efficiency of its application: machine reliably and qualitatively performs the technological process of flattening grains.

Discussion and Conclusion. The use of a power device in the design of the flattener increases the conditioning capacity by 2.08 times while reducing the energy intensity of the process by 1.6 times; the annual economic effect of using the PZ-1M grain flattener with feeding device compared to its analogue is 67,583 rub. at the level of intensification of 49%.

Keywords: flattening, productivity, technology, feed, efficiency, grain, feeding device

Funding: The research was conducted at the Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky under Scientific Program No. AAA-A19-119042290137-1 for 2013–2023.

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

For citation: Sysuev V.A., Savinykh P.A., Kazakov V.A., Sychugov Yu.V. Research and Comparative Testing of a Grain Flattener with a Feeding Device. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):207–221. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.207-221>

Введение

Эффективность животноводческой отрасли в значительной мере определяется качеством потребляемых животными кормов [1]. Важное место при скормливании как в чистом виде, так и в качестве одного из компонентов комбикормов занимает очищенное от примесей плющеное фуражное зерно, сухое или влажное. Так, скормливание влажного плющеного зернового корма улучшает его усвояемость на 5–8 %, что повышает привесы молодняка и надой коров на 7–11 %. Технологии получения влажного плющеного корма имеют свои положительные стороны, например уборка высоковлажного зерна на плющение позволяет начинать ее на 2–3 недели раньше традиционных сроков [2]. Использование технологий плющения зерна экономически эффективно, поэтому их применение весьма актуально [3].

Для осуществления технологического процесса получения плющеного зернового корма, сухого и влажного, в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока разработана, изготовлена и испытана плющилка зерна ПЗ-1. Ее конструктивно-технологическая документация передана в ООО «Нолинский ремонтный завод», который успешно освоил серийный выпуск и использует данную машину в течение последних 4 лет. Однако в условиях конкуренции со стороны отечественных и зарубежных производителей требуется модернизация плющилки ПЗ-1 для увеличения производительности плющения зерна и снижения энергозатрат на данный процесс.

Согласно анализу уровня техники по рассматриваемому вопросу для повышения эффективности получения корма плющилкой необходимо питающее устройство, обеспечивающее подвод исходного фуражного зерна в зону плющения в нужном количестве, с технологически необходимой скоростью

и направлением [4]. Это приведет к увеличению производительности плющения Q , т/ч, и снизит энергопотребление \mathcal{E} , кВт·ч/т, рабочего процесса плющилки.

Цель исследования – разработать схему питающего устройства к плющилке зерна и найти рациональные конструктивно-технологические параметры его активного рабочего органа (питающего вальца), которые увеличат производительность плющения Q и снизят энергопотребление \mathcal{E} . Также важно провести ведомственные и сравнительные испытания усовершенствованной плющилки.

Обзор литературы

Технологии получения плющеного зерна (сухого или влажного) – относительно новый вид производства концентрированных зерновых кормов для нужд животноводства. Их исследованием и использованием занимаются коллективы ученых как в нашей стране, так и за рубежом [5; 6].

Получают плющенный зерновой корм специальные кормоприготовительные машины – плющилки зерна [7; 8]. Их конструкции могут значительно отличаться друг от друга, но рабочий процесс аналогичен: зерновки исходного зернового материала проходят через зазор, который значительно меньше толщины зерновок и образован вращающимися навстречу друг другу цилиндрическими вальцами [9–11]. Рынок производителей и продавцов плющилок зерна достаточно развит как в Российской Федерации, так и за рубежом. Например, финская фирма Aimo Kortteen Конераја Оу производит и продает плющилки Murska 350 S2, Murska 700 S2 с различной производительностью (от 1 до 40 т/ч). Они оснащены рифлеными вальцами для плющения. В комплект входит оборудование для обработки влажного плющеного зерна консервантом. ROmiLL (Чехия) производит не только плющилки

марок М1–М900 с производительностью 1–40 т/ч, но и упаковщики влажного плющеного зерна в полиэтиленовый рукав с устройствами внесения консерванта во влажное плющеное зерно. Республика Беларусь выпускает плющилки Корм-10. Россия так же имеет своих производителей: ООО «Доза-Агро», ЗАО «Лужская сельхозтехника», ООО «Ремонтный завод» (г. Нолинск Кировской области) и др.

Проблемами технологии получения плющеного зернового корма и технических средств для его осуществления занимались А. Н. Перекопский [6], В. А. Сысуев [12; 13], П. А. Савиных [14], А. Ю. Исупов [15–17], В. А. Казаков [12; 13], А. Марчук, В. Романюк, С. Ивановс [18–20].

В лаборатории механизации животноводства ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока предложены новые конструкции плющилок зерна, в том числе двухступенчатых [9; 12; 13]. Проведены научные исследования рабочего процесса плющилок данного типа. С учетом их результатов изготовлены опытные образцы двухступенчатых плющилок ПЗД-3.1 и ПЗД-6 согласно конструкторской документации [9]. Некоторые из них, например ПЗД-3.1, рекомендованы для массового производства.

Для обеспечения наиболее эффективного функционирования плющилки зерна необходимо питающее устройство, расположенное между питающим бункером и зоной плющения и позволяющее обеспечить следующие технологические параметры поступления зерна в зону плющения (межвальцовый зазор): необходимое и достаточное количество зерна для плющения, непрерывная и равномерная его подача, технологически необходимая скорость подачи исходного зерна, исключение

забивания загрузочного окна питающего бункера [4; 12; 13].

Научными исследованиями рабочего процесса питающего устройства и его влияния на эффективность получения плющеного корма плющилками зерна занимались ученые А. М. Мошонкин и В. А. Одегов [4; 9].

Анализ научных работ позволил сделать вывод, что для плющилки зерна наиболее целесообразно применять питающее устройство (питатель) с активным рабочим органом – питающим вальцем с лопастями. Питающее устройство должно располагаться между питающим бункером плющилки и вальцами для плющения, а вращающийся питающий валец устанавливается горизонтально под загрузочным окном питателя по всей его длине, при этом зерно с лопастей вальца через окно попадает в подводящий канал и через него в зону плющения [12; 13].

Материалы и методы

Учеными ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока совместно с А. М. Мошонкиным проведены научные исследования по усовершенствованию рабочего процесса плющилок зерна. Среди результатов разработка конструктивно-технологической схемы одноступенчатой (с двумя вальцами для плющения) плющилки зерна (рис. 1а), оснащенной питающим устройством, и блок-схемы функционирования ее технологического (рабочего) процесса (рис. 1б)¹. Новизна схемы и рабочего процесса питающего устройства плющилки подтверждена патентами № 2557780 и 2628297 [12; 13].

Технологический процесс питающего устройства заключается в следующем. Вращающийся валец с лопастями 6, смонтированный в питающем устройстве 1, дозировано подает зерно

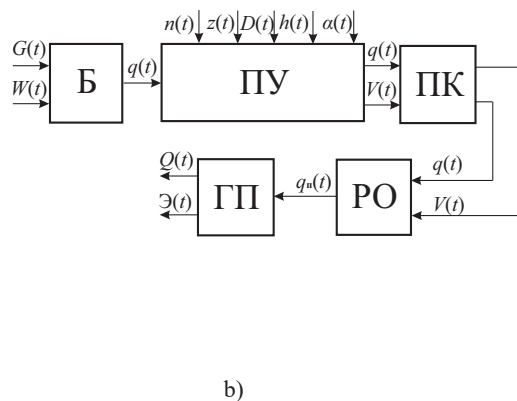
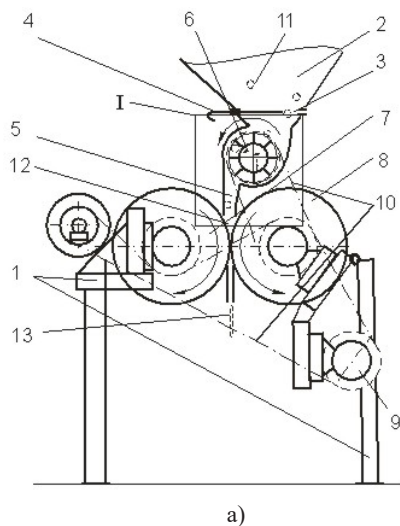
¹ Мошонкин А. М. Совершенствование конструкции и оптимизация конструктивно-технологических параметров питающего устройства плющилки зерна : дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2020. 143 с.

для плющения II через загрузочное окно 3 , регулируемое по высоте, в подводящий канал 5 и через него в зону плющения 12 . Питающий вал обеспечивает технологически необходимую скорость подачи зерна на плющение, а также непрерывность и равномерность его поступления. Величина подачи зерна (производительность плющилки) регулируется заслонкой 4 , а диаметр и частота вращения питающего вальца определяют скорость поступающего зерна в зону плющения 12 .

Блок-схема функционирования технологического (рабочего) процесса плющилки (рис. 1б) заключается в следующем. Подлежащее плющению зерно, имеющее некие свойства среды $W(t)$, загружается в емкость (бункер Б) в количестве $G_n(t)$. Из бункера Б, оснащенного питающим устройством ПУ, зерновой материал со скоростью $V(t)$, придаваемой

ему питающим устройством ПУ, поступает в канал ПК и на выходе из него со скоростью $V(t)$ в зону плющения на рабочие органы РО плющилки. После прохождения зерновым материалом участка РО получается готовый продукт ГП – плющенное зерно. Определяющими параметрами при оценке работы плющилки являются пропускная способность (производительность) $Q(t)$ и удельные энергозатраты $\Xi(t)$ на производство конечного продукта.

С целью повышения эффективности получения корма плющилкой с питающим устройством проведены теоретические и экспериментальные исследования параметров вращающегося вальца данного устройства, оказывающих влияние на выходные показатели рабочего процесса плющения. На первом этапе, с учетом анализа имеющихся научно-технических и патентных литературных



Р и с. 1. а) Схема плющилки зерна с питающим устройством I;

- б) блок-схема технологического (рабочего) процесса; 1 – несущая рама, 2 – питающий бункер, 3 – загрузочное окно; 4 – заслонка для регулировки подачи зерна; 5 – подводящий канал; 6 – питающий валец с лопастями; 7, 8 – вальцы для плющения; 9 – электродвигатель; 10 – клиноременная передача; 11 – исходное зерно; 12 – зона плющения; 13 – готовый продукт

Fig. 1. a) Scheme of grain flattener with a feeding device I; b) block diagram of technological (working) process; 1 – bearing frame; 2 – feeding hopper; 3 – charging door; 4 – flap for adjusting grain feed; 5 – feeding channel; 6 – feeding roller with blades; 7, 8 – rollers for flattening; 9 – electric motor; 10 – V-belt transmission; 11 – source grain; 12 – flattening zone; 13 – finished product

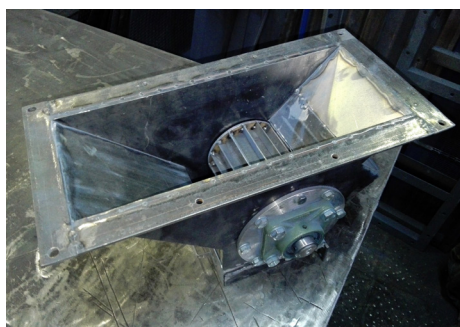
источников, проведены теоретические исследования рабочего процесса плющилки данного типа. В результате выявлены закономерности и связи конструктивно-технологических параметров ее элементов между собой и определено их влияние на рабочий процесс плющения зерна. Величины параметров, оказывающих положительное влияние на процесс плющения, применены при изготовлении экспериментального образца плющилки, затем опробованы и улучшены в реальном рабочем процессе (экспериментальные исследования). Результаты исследований использованы при разработке конструкторской документации на плющилку зерна с питающим устройством.

Изготовлены экспериментальный образец питающего устройства и пи-

тающие вальцы для него (рис. 2а); устройство устанавливалось на экспериментальную плющилку (рис. 2б).

Результаты исследования

Для нахождения рациональных конструктивно-технологических и режимных параметров вальца питающего устройства плющилки проведены теоретические исследования его рабочего процесса. Конструктивно-технологическая схема исследуемого устройства (рис. 1а) соответствует представленной в патентах № 2557780 и 2628297 [12; 13]. Схема движения зерновки (единичного зерна) в рабочей зоне питающего устройства плющилки зерна представлена на рисунке 3а, направление движения по лопасти питающего вальца и действующие на нее силы – на рисунке 3б.



а)



б)

Р и с. 2. а) Экспериментальный образец питающего устройства с вальцами для него; б) установка для исследования рабочего процесса плющения зерна

F i g. 2. а) An experimental sample of a feeding device with rollers for it; б) an installation for studying the working process of grain flattening

Технологический процесс получения плющеного корма плющилкой с питающим устройством заключается в следующем. Зерно для плющения 1 из питающего бункера 2 через загрузочное окно 3 и каналы 8 попадает на лопасти 9 вращающегося вальца 5, под действием центробежных сил движется по ним и сходит в подводящий канал 10 и через него в зону плющения (межвальцовый зазор), образованную вальцами для плющения 6 и 7. В межвальцовом зазоре происходит технологический процесс плющения зерна, получается готовый к скармливанию плющенный зерновой корм.

Движение зерновки по лопасти питающего вальца определяется равнодействующей всех сил, влияющих на нее, и может быть представлено в виде дифференциального уравнения 2-го порядка (с учетом всех действующих сил):

$$m\vec{W} = m\vec{g} + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_c + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $\vec{W} = \ddot{x}$ – абсолютное ускорение частицы зерна при ее движении по лопасти питающего вальца; $m\vec{g}$ – сила тяжести.

$\vec{\Phi}_e$ – кориолисова сила, Н:

$$\vec{\Phi}_e = 2m\omega\vec{V}_r = 2m\omega\dot{x}, \quad (2)$$

где ω – частота вращения питающего вальца, рад/с.

$\vec{\Phi}_c$ – центробежная сила, Н:

$$\vec{\Phi}_c = m\omega^2 r = m\omega^2 x. \quad (3)$$

$\vec{F}_{\text{тр}}$ – сила трения, Н:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = f\vec{N}. \quad (4)$$

\vec{N} – прижимающая сила, Н:

$$N = -mg \sin \omega t + 2m\omega\dot{x}. \quad (5)$$

Проецируя силы на оси координат X и Y (плоскость лопасти и перпендикуляр к ней) (рис. 3б), решаем (1), с учетом (2)–(5), по известным методикам. Получаем решение дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} x &= c_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + c_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + A \cos \omega f + B \sin \omega t, \\ \dot{x} &= \lambda_1 c_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 c_2 \cdot e^{\lambda_2 t} - A \omega \sin \omega f + \\ &\quad + B \omega \cos \omega t, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\lambda_1 = -f\omega + \omega\sqrt{(f^2 + 1)}, \quad (7)$$

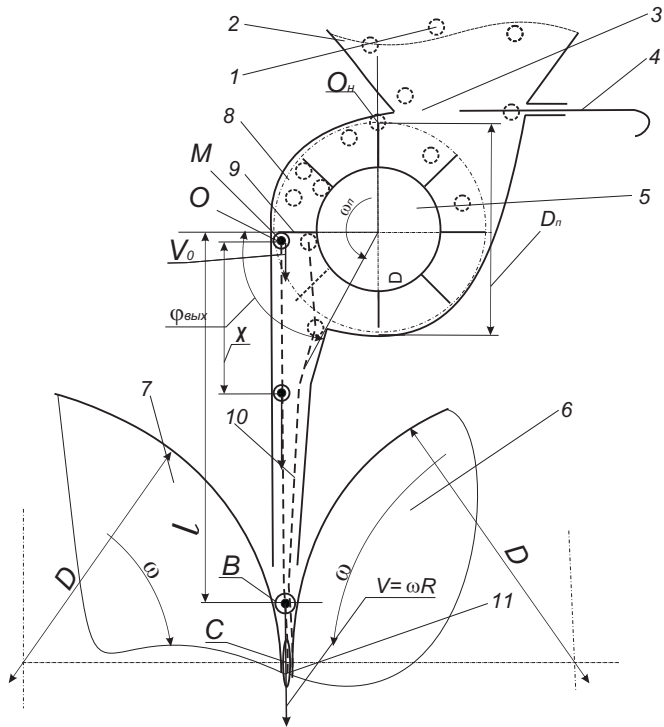
$$\lambda_2 = -f\omega - \omega\sqrt{(f^2 + 1)}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} c_2 = \frac{\lambda_1 r - \lambda_1 A + B\omega}{\lambda_1 + \lambda_2} \\ c_1 = r - \frac{\lambda_1 r - \lambda_1 A + B\omega}{\lambda_1 + \lambda_2} - A \end{cases}, \quad (9)$$

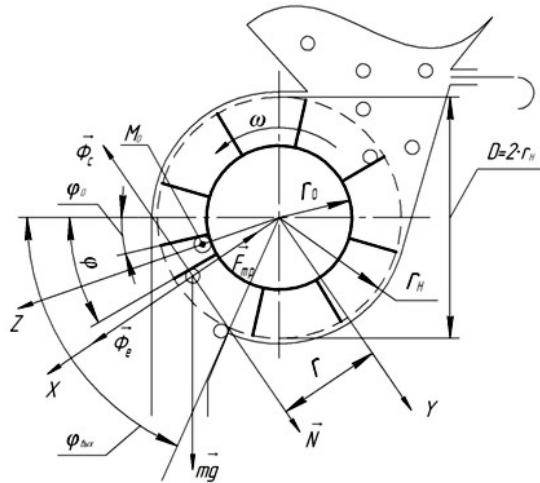
$$\begin{cases} B = \frac{gf}{-2\omega^2 - 2f\omega^2 + gf} \\ A = \frac{gf^2}{-2\omega^2 - 2f\omega^2 + gf} - \frac{g}{2\omega^2} \end{cases}. \quad (10)$$

Уравнение (6), с учетом (7)–(10), определяет параметры движения зерновки по лопасти вальца: расстояние от центра вращения вальца до зерновки, ее скорость и направление в момент времени t при заданных ранее ω и f .

Выражение (6) с помощью разработанной компьютерной программы в приложении Microsoft Excel позволяет определить и представить графически расположение r , м, частицы зерна на лопасти вальца, в любой момент времени t в зависимости от угла поворота вальца φ , град, при различных фиксированных значениях частоты его вращения



а)



б)

Р и с. 3. а) Схема перемещения зерновки в питающем устройстве плющилки зерна;
 б) действующие на нее силы при движении по лопасти вальца

F i g. 3. а) Scheme of movement of the grain in the feeding device of the grain flattener;
 б) the forces acting on grains when moving along the blade of the roller

n , мин⁻¹, коэффициента трения f зерновки о материал лопасти вальца, а также от величины r_0 , м, начала движения зерновки по лопасти вальца. Полученные зависимости позволяют определить степень влияния различных факторов на параметры движения зерновки по лопасти вальца.

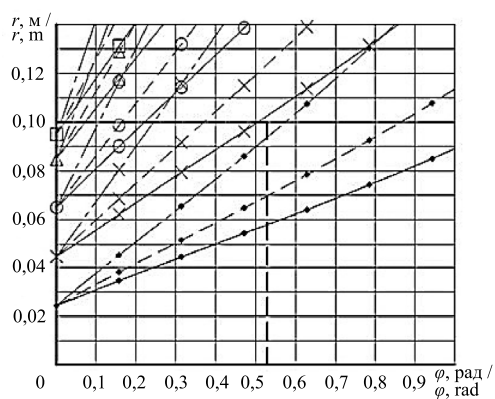
На рисунке 4 приведены полученные зависимости для частоты вращения питающего вальца $n = 600$ мин⁻¹ (рис. 4а), $n = 900$ мин⁻¹ (рис. 4б). Разработанная программа позволяет получить графики и для других n , например $n = 400$ мин⁻¹. Но питающий валец с частотой вращения $n < 600$ мин⁻¹ и своим радиусом от центра вращения до наружных кромок своих лопастей $r = 0,1$ м (принятый нами для дальнейших исследований) не обеспечивает подачу необходимого количества зерна в рабочую зону плющилки, вследствие этого пришлось ограничиться величинами $n = 600$ мин⁻¹ (рис. 4а) и $n = 900$ мин⁻¹ (рис. 4б).

Проведена проверка эффективности исследуемого устройства.

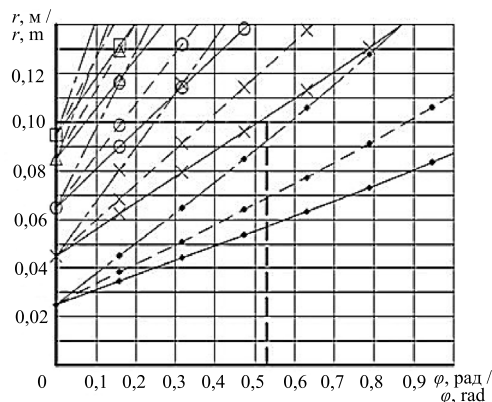
Установлено, что при величине внутреннего радиуса питающего вала $r_0 \geq 0,045$ м все зерно сходит с лопасти в подводящий канал под требуемым углом $\varphi_{\text{вых}} = 60^\circ$ при $n \geq 600$ мин⁻¹ и коэффициенте трения зерновки о лопасть вальца $f = 0,4$. Следовательно, питающий вал и устройство эффективны.

Результаты данных исследований использованы при разработке конструкторской документации на изготовление плющилки зерна с питающим устройством, согласно которой в ПКБ НИИСХ Северо-Востока совместно с ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока изготовлен опытный образец данной кормоприготовительной машины – плющилка сухого и влажного зерна ПЗ–1М.

В период с 03.07.2019 г. по 06.07.2019 г. на базе комплекса «Зиново» ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока проведены ведомственные испытания плющилки зерна с питающим устройством ПЗ–1М (рис. 5а). Также плющилку сравнивали с серийно выпускаемой плющилкой ПЗ-1 ООО «Ремонтный завод» (г. Ноллинск Кировской обл.) (рис. 5б).



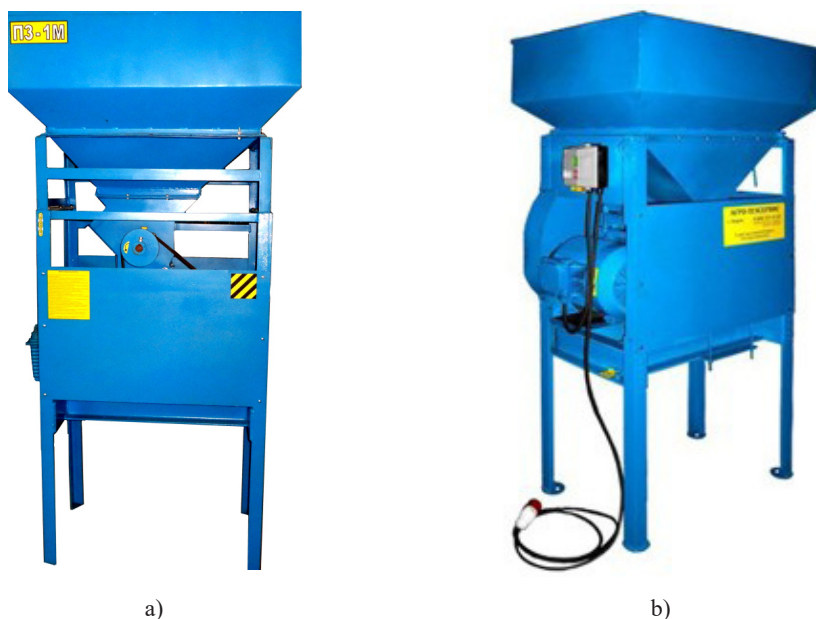
а)



б)

Р и с. 4. Зависимость параметров движения зерновки по лопасти питающего вальца от величины угла его поворота φ при различной частоте вращения вала: а) $n = 600$ мин⁻¹; б) $n = 900$ мин⁻¹

F i g. 4. The dependence of the parameters of the grain motion along the blade of the feed roller on the value of its rotation angle φ at different shaft speeds: а) $n = 600$ мин⁻¹; б) $n = 900$ мин⁻¹



Р и с. 5. Общий вид: а) плющилка фуражного зерна с питающим устройством ПЗ-1М; б) серийно выпускаемая плющилка ПЗ-1

F i g. 5. General view: а) PZ-1M grain flattener with a feeding device; б) PZ-1 series-produced grain flattener

Исходным зерном для плющения выбран ячмень сорта Абава влажностью 12 %. Испытания проведены согласно ГОСТу Р 54783-2011, ОСТу 10.2.2-2002 и показали, что качество произведенного плющилкой ПЗ-1М зернового корма соответствует требованиям СТО АИСТ 1.14.2-2020: средневзвешенная толщина хлопьев готового продукта 1,0–1,3 мм, их однородность 7,5–8,9 %, целых зерен в плющеном зерновом корме нет². При осуществлении технологического процесса производительность плющилки ПЗ-1М составила 1,2–1,4 т/ч при затратах энергии 3,6–4,2 кВт·ч/т получаемого плющеного зерна (корма).

Сравнительные испытания плющилок ПЗ-1 и ПЗ-1М показывают высокую

эффективность применения плющилки ПЗ-1М с питающим устройством: более чем в 2 раза выросла пропускная способность (производительность) плющилки ПЗ-1М по сравнению с аналогом – серийно выпускаемой ПЗ-1 (0,59–1,22 т/ч). При этом энергоёмкость технологического процесса плющения новой кормоприготовительной машиной уменьшилась в 1,6 раза (с 6,2 до 3,75 кВт·ч/т) при одинаковом качестве производимого продукта – плющеного зерна.

Обсуждение и заключение

Проведена экономическая и энергетическая оценка технического средства для получения зернового корма – плющилки зерна с питающим устройством ПЗ-1М. Аналогом для расчета

² ГОСТ 54783-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2020 ; ОСТ 10.2.2-2002. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. М. : Изд-во стандартов, 2002 ; СТО АИСТ 1.14.2-2020. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для кормопроизводства. Показатели назначения и надежности. М., 2020.

экономической эффективности выбрана серийно выпускаемая плющилка ПЗ-1. Принято, что годовая нагрузка в хозяйстве на данные машины составляет 300 т получаемого плющеного корма.

Результаты проведенных исследований показали, что применение плющилки ПЗ-1М эффективно. Получаемый годовой экономический эффект составляет 67 583 руб., при этом удельные капитальные вложения снижаются в 1,48 раза (с 616 до 415 руб./т), удельные эксплуатационные затраты – в 1,48 раза (с 258,4 до 161,9 руб./т).

Энергетическая эффективность применения новой машины, по сравнению с аналогом, оценивается с помощью уровня интенсификации И, %. В нашем случае при использовании плющилки ПЗ-1М вместо ПЗ-1 И = 49 %. Общие (совокупные) затраты энергии на производство единицы продукции плющилкой ПЗ-1М на 49 % меньше, чем у серийно выпускаемой ПЗ-1.

Подводя итог, стоит отметить следующее:

1. Ученые ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока разработали схему питающего устройства к плющилке зерна. Ее активный рабочий орган – питающий валец

с лопастями. Новизна технических решений подтверждена патентами.

2. Найдены рациональные параметры вальца питающего устройства, повышающие эффективность получения корма. Установлено, что при величине внутреннего радиуса питающего вальца $r_0 \geq 0,045$ м все зерно сходит с лопасти в подводящий канал и через него на плющение под требуемым углом $\varphi_{\text{вых}} = 60^\circ$ при частоте оборотов $n \geq 600$ мин⁻¹ и коэффициенте трения зерна о лопасть вальца $f \leq 0,4$. Таким образом, определены величины параметров, при которых питающий вал и устройство эффективны.

3. Ведомственные и сравнительные испытания плющилки зерна ПЗ-1М с питающим устройством показали высокую эффективность ее применения: плющилка ПЗ-1М надежно и качественно выполняет технологический процесс. Производительность плющения Q возрастает в 2,08 раза по сравнению с аналогом. Энергоемкость процесса Э снижается в 1,6 раза. Годовой экономический эффект от применения плющилки с питающим устройством ПЗ-М составляет 67 583 руб. при уровне интенсификации И = 49 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка и создание кормоприготовительного оборудования модульного типа с использованием методов математического и физического моделирования / В. Г. Мохнаткин [и др.] // Пермский аграрный вестник. 2021. № 1. С. 14–25. URL: <https://clck.ru/fbKQj> (дата обращения: 01.03.2022).

2. Горбунов Б. И., Денцов М. Н., Тюльнев А. В. Оптимизация энергетических ресурсов при реализации агротехнологий в складывающихся условиях производства // Вестник НГИЭИ. 2016. № 8. С. 102–109. URL: <https://clck.ru/fbKXa> (дата обращения: 01.03.2022).

3. Savinykh P. A., Kazakov V., Borek K. Tekhnologii proizvodstva zernovykh kormov plyushcheniyem // Woda-Srodowisko-Obszary Wiejskie. 2019. Vol. 19, Issue 3. P. 45–62. URL: https://www.itp.edu.pl/old/wydawnictwo/woda/zeszyt_67_2019/Savinykh%20i%20in.pdf (дата обращения: 01.03.2022).

4. Мошонкин А. М., Чернятьев Н. А., Герасимова С. П. Исследования и оптимизация конструктивно-технологических параметров питающего устройства плющилки зерна // Вестник НГИЭИ. 2020. № 4. С. 5–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42686505> (дата обращения: 01.03.2022).

5. Солонщиков П. Н., Мошонкин А. М., Доронин М. С. Совершенствование машин и оборудования в производстве кормов в животноводстве // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9. С. 64–76. URL: <https://clck.ru/fbL2Y> (дата обращения: 01.03.2022).

6. Перекопский А. Н. Моделирование уборки зерновых культур в зависимости от погодных условий // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 10. С. 397–399. URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4257> (дата обращения: 01.03.2022).
7. Коновалов В. В. Терюшков В. П., Терехин М. А. Результаты исследований плющилки зерна // Вестник ВНИИМЖ. 2016. № 4. С. 56–60. URL: <https://clck.ru/fbLPT> (дата обращения: 01.03.2022).
8. Дисксовая плющилка зерна / В. Ф. Некрашевич [и др.] // Сельский механизатор. 2009. № 9. С. 23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12860245> (дата обращения: 01.03.2022).
9. Одегов В. А., Комкин А. С., Шилин В. В. Исследование влияния окружной скорости валцов и влажности материала на основные показатели рабочего процесса двухступенчатого вальцового станка // Пермский аграрный вестник. 2018. № 1. С. 28–33. URL: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/05/1-2018-28-33.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
10. Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part / A. Marczuk [et al.] // Jokull Journal. 2017. Vol. 67, Issue 8. P. 8–21.
11. Saitov V. E., Farafonov V. G., Suvorov A. N. Theoretical Motivation of the Technical Decisions of Division of the Corn Mixtures [Электронный ресурс] // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2014. Issue 1. URL: https://www.science-sd.com/456-24505?sd_com=00cdab8c43688528fd43c378b3273f55 (дата обращения: 01.03.2022).
12. Двухступенчатая плющилка зерна для производства зерновых кормов : патент 2628297 Российская Федерация / Сысуев В. А. [и др.] ; № 2015137568 ; заявл. 02.09.2015 ; опубл. 10.03.2017. 4 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/6f/bc/323f60b6e4f612/RU2015137568A.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
13. Двухступенчатая плющилка зерна для ресурсоэнергосберегающей технологии производства зерновых кормов : патент 2557780 Российская Федерация / Сысуев В. А. [и др.] ; № 201352556/13 ; заявл. 26.11.2013 ; опубл. 27.07.2015. 6 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ef/d5/c0/3326dfb8638022/RU2557780C2.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
14. Prospects for the Use of Microwave Energy in Grain Crop Seeding / F. A. Kipriyanov [et al.] // Journal of Water and Land Development. 2021. Issue 49. P. 74–78. doi: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137098>
15. Research Results of Experimental Automated System for Dosing Bulk Materials / S. Bulatov [et al.] // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (26–28 May 2021). Vol. 20. Jelgava, 2021. P. 199–204. doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF043>
16. Результаты экспериментальных исследований микронизации зерна ржи / П. А. Савиных [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2021. № 6. С. 26–36. doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-6-26-36>
17. Савиных П. А., Исупов А. Ю., Киприянов Ф. А. Термическая обработка зерна как способ повышения его усвояемости // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 2. С. 31–40. doi: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-77-2-31-40>
18. Modeling and Simulation of Particle Motion in the Operation Area of a Centrifugal Rotary Chopper Machine [Электронный ресурс] / A. Marczuk [et al.] // Sustainability. 2019. Vol. 11, Issue 18. doi: <https://doi.org/10.3390/su11184873>
19. The Application of Similarity Theory and Dimensional Analysis to the Study of Centrifugal-Rotary Chopper for Forage Grain / W. Romaniuk [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14, Issue 15. doi: <https://doi.org/10.3390/en14154501>
20. Research in Centrifugal Rotary Grinder of Forage Grain / P. Savinyh [et al.] // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (26–28 May 2021). Jelgava, 2021. P. 205–211. URL: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF044.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).

Поступила 05.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 15.04.2022

Об авторах:

Сысуйев Василий Алексеевич, главный научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, профессор, академик РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, Researcher ID: B-8519-2019, Scopus ID: 56728483000, sisuev@mail.ru

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

Казаков Владимир Аркадьевич, старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3512-317X>, Researcher ID: CAH-0362-2022, Scopus ID: 56727628500, kazakov.vladimir.263@mail.ru

Сычугов Юрий Вячеславович, старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6694-9575>, Researcher ID: CAH-1230-2022, Scopus ID: 57202650179, yuri.sychugov@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В. А. Сысуйев – научное руководство, разработка технического задания, проведение критического анализа исследований.

П. А. Савиных – анализ и доработка программы исследований, непосредственное руководство исследованиями, теоретические исследования.

В. А. Казаков – выполнение экспериментально-теоретических исследований и получение результатов.

Ю. В. Сычугов – практическое применение результатов исследований и проведение испытаний.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mokhnatkina V.G., Poyarkov M.S., Gorbunov R.M., Yakimov V.A. Development and Manufacturing of Modular Feed Preparation Equipment Using Mathematical and Physical Methods of Modeling. *Perm Agrarian Journal*. 2021;(1):14–25. Available at: <https://clck.ru/fbKQj> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Gorbunov B.I., Dentsov M.N., Tyulnev A.V. Optimization of Energy Resources in the Implementation of Agricultural Technologies in the Prevailing Conditions of Production. *Vestnik NGIEI*. 2016;(8):102–109. Available at: <https://clck.ru/fbKXa> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

3. Savinykh P. A., Kazakov V., Borek K. [Technologies of Grain Fodder Production by Ivying]. *Water-Environment-Rural Areas*. 2019;19(3):45–62. Available at: https://www.itp.edu.pl/old/wydawnictwo/woda/zeszyt_67_2019/Savinykh%20i%20in.pdf (accessed 01.03.2022). (In Russ.)

4. Moshonkin A.M., Chernyatiev N.A., Gerasimova S.P. Research and Optimization of Constructively and Technological Parameters of the Feed Device of the Grain Flatterer. *Vestnik NGIEI*. 2020;(4):5–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42686505> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

5. Solonshchikov P.N., Moshonkin A.M., Doronin M.S. Improvement of Machinery and Equipment in the Production of Fodder. *Vestnik NGIEI*. 2017;(9):64–76. Available at: <https://clck.ru/fbL2Y> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

6. Perekopskiy A.N. Modeling of Grain Harvesting under Various Weather Conditions. *International Journal of Experimental Education*. 2013;(10):397–399. Available at: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4257> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Terekhin M.A. The Results of Grain Flattening Machine Studying. *Bulletin of the Russian Research Institute for Mechanization of Animal Husbandry*. 2016;(4):56–60. Available at: <https://clck.ru/fbLPT> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Nekrashevich V.F., Vorobyova I.V., Ivanova I.A., et al. Grain Disk Crusher. *Rural Mechanic*. 2009;(9):23. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12860245> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Odegov V.A., Komkin A.S., Shilin V.V. The Influence of Circumferential Velocity of Rollers and Material Moisture Content on the Main Indicators of Workflow of a Two-Step Roller Machine. *Perm Agrarian Journal*. 2018;(1):28–33. Available at: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/05/1-2018-28-33.pdf> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Marczuk A., Caban J., Kartashevich A.N., et al. Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part. *Jokull Journal*. 2017;67(8):8–21.
11. Saitov V.E., Farafonov V.G., Suvorov A.N. Theoretical Motivation of the Technical Decisions of Division of the Corn Mixtures. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;(1). Available at: https://www.science-sd.com/456-24505?sd_com=00cdab8c43688528fd43c378b3273f55 (accessed 01.03.2022).
12. Sysuev V.A., Savinykh P.A., Aleshkin A.V. [Two-Stage Grain Flattener for the Production of Grain Feed]. Patent 2,628,297 Russian Federation. 2017 March 10. 4 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/6f/bc/323f60b6e4f612/RU2015137568A.pdf> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
13. Sysuev V.A., Savinykh P.A., Kazakov V.A., Sychugov Yu.V. [Two-Stage Grain Conditioner for Energy-Saving Technology of Grain Fodder Production]. Patent 2557780 Russian Federation. 2015 July 27. 6 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ef/d5/c0/3326dfb8638022/RU2557780C2.pdf> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
14. Kipriyanov F.A., Savinykh P.A., Isupov A.Yu., et al. Prospects for the Use of Microwave Energy in Grain Crop Seeding. *Journal of Water and Land Development*. 2021;(49):74–78. doi: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137098>
15. Bulatov S., Nechaev V., Savinykh P., Rucins A. Research Results of Experimental Automated System for Dosing Bulk Materials. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (26–28 May 2021). Vol. 20. Jelgava; 2021. p. 199–204. doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF043>
16. Savinykh P.A., Isupov A.Yu., Kipriyanov F.A., Palitsyn A.V. The Results of Experimental Researches of Micronization of Rye Grain. *Vestnik NGIEI*. 2021;(6):26–36. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-6-26-36>
17. Savinykh P.A., Isupov A.Y., Kipriyanov F.A. Thermal Treatment of Grain as a Way to Increase Its Digestibility. *International Technical and Economic Journal*. 2021;(2):31–40. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-77-2-31-40>
18. Marczuk A., Caban J., Aleshkin A.V., et al. Modeling and Simulation of Particle Motion in the Operation Area of a Centrifugal Rotary Chopper Machine. *Sustainability*. 2019;11(18). doi: <https://doi.org/10.3390/su11184873>
19. Romaniuk W., Savinykh P., Borek K., et al. The Application of Similarity Theory and Dimensional Analysis to the Study of Centrifugal-Rotary Chopper of Forage Grain. *Energies*. 2021;14(15). doi: <https://doi.org/10.3390/en14154501>
20. Savinykh P., Isupov A., Ivanov I., Ivanovs S. Research in Centrifugal Rotary Grinder of Forage Grain. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”

(26–28 May 2021). Jelgava; 2021. p. 205–211. Available at: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF044.pdf> (accessed 01.03.2022).

Submitted 05.03.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 15.04.2022

About the authors:

Vasily A. Sysuev, Senior Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, Academician of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, Researcher ID: B-8519-2019, Scopus ID: 56728483000, sisuev@mail.ru

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

Vladimir A. Kazakov, Senior Researcher at the Laboratory of Livestock Mechanization, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3512-317X>, Researcher ID: CAH-0362-2022, Scopus ID: 56727628500, kazakov.vladimir.263@mail.ru

Yuri V. Sychugov, Senior Researcher at the Laboratory of Livestock Mechanization, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6694-9575>, Researcher ID: CAH-1230-2022, Scopus ID: 57202650179, yuri.sychugov@mail.ru

Contribution of the authors:

V. A. Sysuev – scientific guidance, development of terms of reference, and critical analysis of research.

P. A. Savinykh – analysis and finalization of the research program, direct supervision of research, and theoretical research.

V. A. Kazakov – performing experimental and theoretical research, obtaining results.

Yu. V. Sychugov – practical application of the research results and testing.

All authors have read and approved the final manuscript.



Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования

В. А. Овчинников¹✉, Е. А. Кильмяшкин¹, А. С. Князьков¹,
А. В. Овчинникова¹, Н. А. Жалнин¹, Е. С. Зыкин²

¹ Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

² Ульяновский ГАУ (г. Ульяновск, Российская Федерация)

✉ ovchinnikovv81@yandex.ru

Аннотация

Введение. Совершенствование агропромышленного комплекса подразумевает создание новых и модернизацию имеющихся рабочих органов и машин. Важным условием при этом является применение современных технологий и постоянное сотрудничество с реальным производством. Цель исследования – разработать адаптивный центробежный рабочий орган и повысить качество внесения минеральных удобрений.

Материалы и методы. На основании изучения состояния вопроса и требований, предъявляемых к машинам для внесения минеральных удобрений, разработан и изготовлен адаптивный центробежный рабочий орган. На всех стадиях применялись методы компьютерного проектирования и быстрого прототипирования на основе аддитивных технологий.

Результаты исследования. В результате использования представленных рабочих органов увеличилась ширина захвата агрегата на 10,0–22,5%. Экспериментальные рабочие органы, по сравнению с серийными, позволяют уменьшить неравномерность внесения гранул минеральных удобрений на 13,4% за счет их перераспределения с центральной зоны по краям.

Обсуждение и заключение. В результате экспериментальных исследований доказана эффективность применения разработанного адаптивного центробежного рабочего органа. Он позволяет увеличить равномерность распределения гранул минеральных удобрений и рабочую ширину захвата агрегата. Современные методы проектирования позволяют значительно сократить время и расходы.

Ключевые слова: минеральные удобрения, энергосберегающие технологии, рабочий орган, равномерность распределения, 3D, CAD-модель, прототипирование, экспериментальные исследования

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования / В. А. Овчинников [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 222–234. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

Original article

Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies

V. A. Ovchinnikov^a✉, E. A. Kilmyashkin^a, A. S. Knyazkov^a,
A. V. Ovchinnikova^a, N. A. Zhalnin^a, E. S. Zykin^b

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

^b Ulyanovsk State Agrarian University (Ulyanovsk, Russian Federation)

✉ ovchinnikovv81@yandex.ru

Abstract

Introduction. Improvement of the agro-industrial complex involves the creation of new and modernizations of existing working tools and machines. The important conditions for this are the application of modern technologies and ongoing cooperation with the actual manufacturing. The aim of the research is to develop an adaptive centrifugal working tool and improve the quality of mineral fertilization.

Materials and Methods. The adaptive centrifugal working tool was developed and manufactured based on studying the state of the matter and requirements to machines for mineral fertilization. At all stages of the research, there were used computer-aided design and rapid prototyping methods based on additive technologies.

Results. As a result of the use of the presented working tools, the machine operating width has increased by 10.0–22.5%. Experimental working tools, in comparison with serial ones, allow decreasing uneven distribution of mineral fertilizers by 13.4% due to their redistribution from the central zone to the edges.

Discussion and Conclusion. As a result of experimental studies, the efficiency of the developed adaptive centrifugal working tools has been proved. It allows increasing uniformity of mineral fertilizer distribution and the machine operating width. Modern design methods make it possible to considerably reduce time and costs.

Keywords: mineral fertilizers, energy-saving technologies, working tool, uniformity of distribution, 3D, CAD model, prototyping, experimental research

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

For citation: Ovchinnikov V.A., Kilmyashkin E.A., Knyazkov A.S., et al. Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

Введение

В целях обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации внутреннее потребление зерна

должно не менее чем на 95 процентов состоять из отечественного зерна¹.

Для того чтобы достичь поставленную цель, снизить себестоимость

¹ Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45106> (дата обращения: 01.03.2022).

производства зерна и сохранить конкурентоспособность в данном направлении, необходимо применять современные энергосберегающие технологии на всех этапах производства [1–5].

Одним из таких этапов является внесение удобрений². Именно на данном этапе происходит закладка питательных элементов, используемых растениями в течение всего периода вегетации. Кроме того, внесение удобрений приводит к восстановлению плодородия почвы [6].

В последнее время чаще всего вносят минеральные гранулированные удобрения [7]. Основным преимуществом является высокая производительность машин при их внесении, а также транспортировка, хранение и т. д.³

Главным требованием при внесении минеральных удобрений является равномерность их распределения по полю. Неравномерность внесения приводит к неоднородности структуры посевов, накоплению нитратов, а также к загрязнению окружающей среды [8–10].

Поэтому исследования, посвященные повышению качества внесения минеральных удобрений по поверхности поля, являются актуальными и имеют важное научно-техническое и хозяйственное значение для агропромышленного комплекса страны.

Обзор литературы

Машины для внесения минеральных удобрений, как правило, выпускаются в навесном и прицепном исполнении и агрегируются с энергетическими средствами. В последние годы расширяется линейка самоходных машин, в том числе и на шинах сверхнизкого давления. Их объединяет центробежный рабочий орган, на качественные показатели работы которого влияют конструктивные и кинематические параметры⁴ [11; 12]. Неоспоримые преимущества машин с центробежными дисковыми рабочими органами – это их цена, надежность и производительность. В зависимости от технологии внесения минеральных удобрений и специфики сельскохозяйственного предприятия используют машины с одно- и двухдисковыми центробежными аппаратами [13]. Многочисленными исследованиями установлено, что машины с однодисковыми аппаратами чаще всего применяются для внесения малых и средних норм [14].

Формы рабочих органов, как правило, имеют плоское круглое исполнение, реже квадратное. Существуют рекомендации по использованию рабочих органов со спиралевидными вырезами кромки диска, а также сферические, конусные и диски более сложных форм⁵ [15].

Диаметр рабочих органов находится в диапазоне 300–900 мм, а частота их

² Лапа В. В. Стратегические вопросы ресурсосбережения в использовании удобрений // Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси : сборник научных трудов. Минск, 2007. С. 42–47. URL: <https://agrosbornik.ru/sovremennyye-resursosberegayushhie-tekhnologii/1105-strategicheskie-voprosy-resursosberezheniya-v-ispolzovanii-udobrenij.html> (дата обращения: 01.03.2022).

³ Андреев К. П. Разработка и обоснование параметров рабочих органов самозагружающейся машины для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений : дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2017. 136 с.

⁴ Гаврилов И. И., Петровец В. Р. Выбор рабочего органа машин для внесения минеральных удобрений // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сборник научных трудов. Горки : БГСХА, 2016. Вып. 2. С. 16–20. URL: <https://pandia.ru/text/80/251/60045.php> (дата обращения: 01.03.2022).

⁵ Белинский А. В. Разработка теории и технических средств для поверхностного внесения минеральных удобрений и мелиорантов : дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2005. 398 с.

вращения до 1 000 об/мин. По мнению ряда исследователей, размеры рабочих органов и частота вращения увеличиваются с целью повышения производительности⁶.

Основными недостатками центробежных рабочих органов является то, что они не всегда обеспечивают высокую равномерность внесения, а также повреждают гранулы минеральных удобрений на высоких оборотах исполнительного элемента [16–18].

Материалы и методы

К основным качественным показателям работы разбрасывателей относят рабочую ширину захвата и равномерность распределения минеральных удобрений по поверхности поля. Как показывает практика, на оба показателя существенное влияние оказывает скорость гранул в момент схода их с центробежного рабочего органа:

$$v = \omega \cdot R, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость рабочего органа, рад/с; R – радиус рабочего органа, м.

После схода с рабочего органа на гранулы минеральных удобрений действуют сила тяжести G и сила сопротивления воздушного потока R (рис. 1).

Кроме скорости на дальность полета гранул минеральных удобрений

оказывают влияние угол схода частиц с рабочего органа, высота установки, аэродинамические свойства удобрений и т. д.:

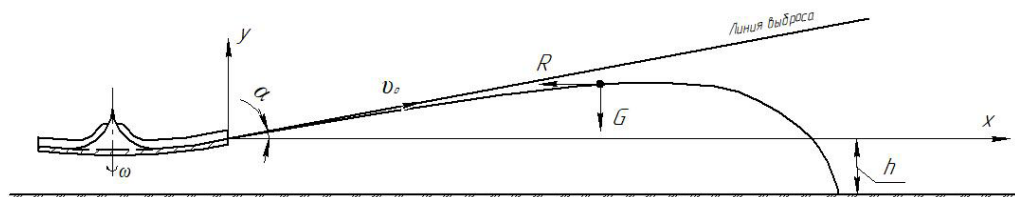
$$x = \frac{v_0^2 \sin^2 2\alpha}{g} \left(\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{hg}{2v_0^2 \sin \alpha}} \right), \quad (2)$$

где v_0 – абсолютная скорость схода гранул с диска, м/с; α – угол схода гранул относительно горизонта, град; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – высота установки рабочего органа, м.

Если предположить, что угол и скорость схода гранул с разных точек рабочего органа будет отличаться, то и дальность их полета будет различной, что благоприятно отразится на равномерности распределения⁷.

На основании данного предположения предложена конструкция адаптивного центробежного рабочего органа (рис. 2), новизна технического решения которого подтверждена патентами РФ [19; 20].

Адаптивный центробежный рабочий орган выполнен в виде диска 2 сферической формы со спиралевидными вырезами 3. На диске установлена коническая часть 1. Разбрасывающие лопасти 4 различной длины расположены на конической части 1 и переходят

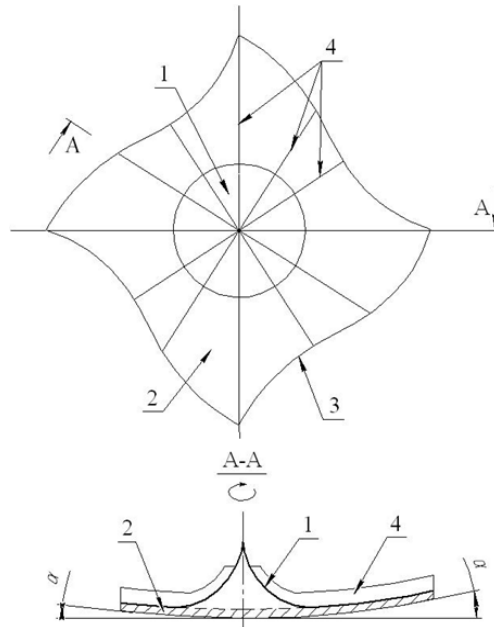


Р и с. 1. Схема к определению дальности полета гранул минеральных удобрений

F i g. 1. Scheme for determining the flight range of mineral fertilizer pellets

⁶ Лепшеев О. М. Обоснование конструктивно-режимных параметров низкорамной машины для внесения минеральных удобрений : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2017. 140 с. ; Следченко В. А. Совершенствование технологического процесса распределения известьсодержащих материалов центробежным разбрасывателем : дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2012. 141 с.

⁷ Даськин И. Н. Обоснование параметров и режимов работы центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений на склонах : дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2013. 161 с.



Р и с. 2. Адаптивный центробежный рабочий орган:

1 – коническая часть; 2 – диск; 3 – спиралевидные вырезы; 4 – лопасти

Fig. 2. Adaptive centrifugal working body: 1 – conical part; 2 – disk; 3 – spiral cutouts; 4 – blades

на диск 2. Согласно выражению (1), с лопастей различной длины гранулы минеральных удобрений будут сходиться с разной скоростью и под разными углами α (рис. 1), что окажет влияние на дальность полета и равномерность распределения туков.

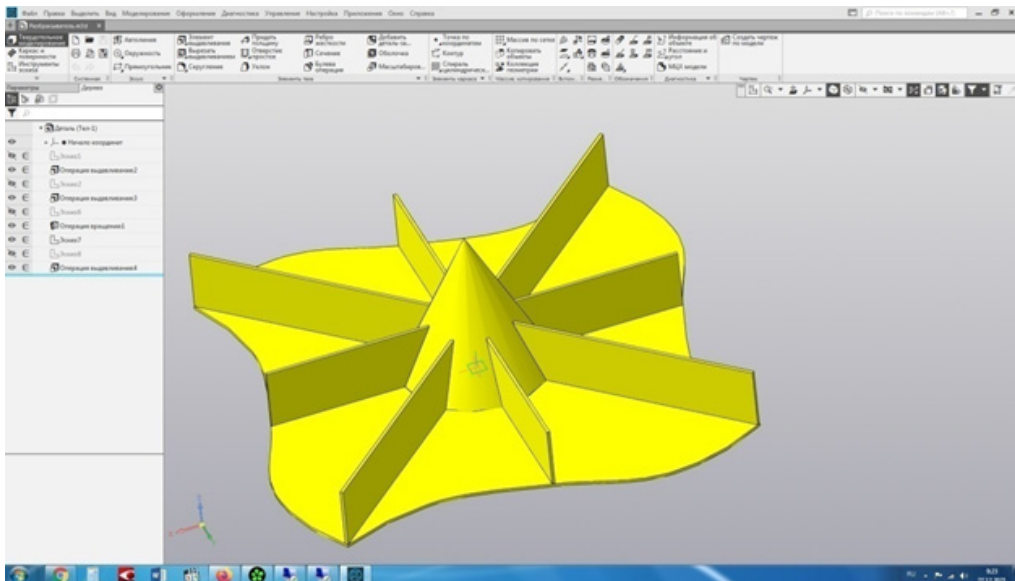
Результаты исследования

С целью дальнейшей оптимизации и доработки конструкции рабочего органа разбрасывателя была создана пространственная модель (рис. 3). Исследования механических систем посредством программных средств делают возможным поиск наиболее проблемных мест, которые требуют последующей доработки или модификации. Это существенно сокращает сроки получения конечного инновационного продукта. Такие изыскания просто необходимы для изменения и оптимизации геометрических параметров диска и лопастей в целом [21].

Создание CAD-модели (Computer-Aided Design) рабочего органа разбрасывателя удобрений может быть как окончательным, так и промежуточным этапом проектирования. В последнем случае создается САМ-модель (Computer-Aided Manufacturing), которая дает возможность воспроизвести инновационную модель в материале в виде прототипа [22].

На таком этапе воспроизведения прототипа необходимо акцентировать внимание на возможных несовершенствах конструкции.

Для создания такого рода прототипов лучше всего подходят 3D-принтеры. Полученную таким образом модель можно изучать вживую. Такое визуальное исследование прототипа позволяет сделать заметными существенные недостатки. Порой при проектировании исследование компьютерной модели не дает возможности полноценно изучить ее, что делает незаметными недостатки [23; 24].



Р и с. 3. 3D-модель адаптивного центробежного рабочего органа
 F i g. 3. 3D model of adaptive centrifugal working tool

Поставлена цель создать рабочий прототип и установить его на серийный разбрасыватель МВУ-1200 производства «МордовАгроМаш» вместо штатных рабочих органов.

Использование таких современных средств проектирования существенно сокращает время, а у модели создаваемого объекта практически отсутствуют серьезные погрешности.

В нашем случае прототипы рабочего органа были созданы на 3D-принтере ProJet по технологии MJM с точностью построения 0,01–0,02 мм на 1 см в масштабе 1:1 из фотополимера, по свойствам схожего с АБС-пластиком (рис. 4).

Изготовлено 3 прототипа рабочего органа с различными углами сферической части от 0 до 10°. Каждый из полученных прототипов испытывали

на однодисковом разбрасывателе минеральных удобрений НРУ-0,5 в реальных условиях (рис. 5)⁸. Основными контролируемыми показателями при этом являлись равномерность внесения минеральных удобрений и величина рабочей ширины захвата.

В качестве критерия оптимизации рассматривали неравномерность распределения гранул минеральных удобрений по рабочей ширине захвата. На основании методики априорного ранжирования были определены следующие факторы, оказывающие наибольшее влияние на критерий оптимизации: скорость движения агрегата, угол сферической части рабочего органа и длина разбрасывающих лопастей. Результаты экспериментальных исследований рабочих органов, на примере внесения нитрофоски, представлены на рисунке 6.

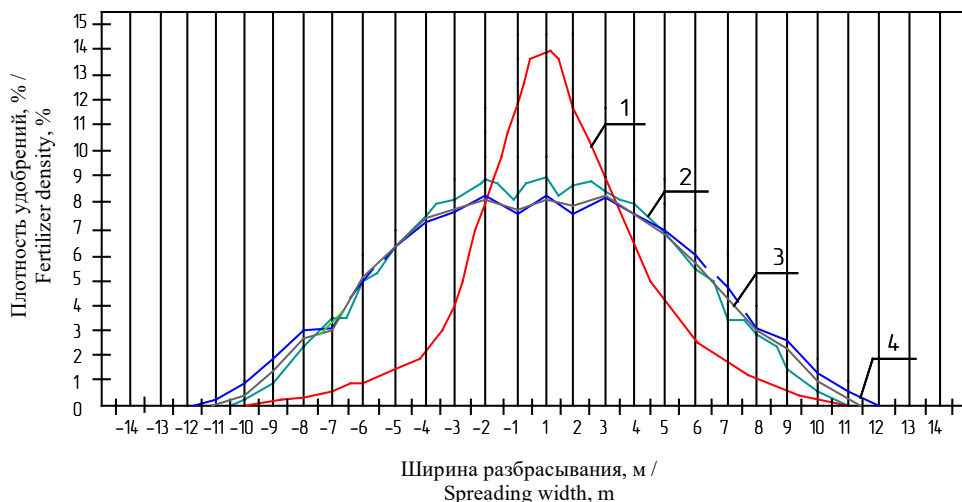
⁸ ГОСТ 28714-2007. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний. М. : Стандартиформ, 2020.



Р и с. 4. Процесс печати 3D-принтера, готовый прототип
F i g. 4. 3D printer printing process, finished prototype



Р и с. 5. Фрагмент предварительных испытаний
F i g. 5. Fragment of preliminary tests



Р и с. 6. Схема распределения минеральных удобрений: 1 – серийный рабочий орган; 2 – экспериментальный рабочий орган с углом сферической части 0° ; 3 – рабочий орган с углом сферической части 5° ; 4 – рабочий орган с углом сферической части 10°

F i g. 6. Scheme of distribution of mineral fertilizers: 1 – serial working body; 2 – experimental working body with a spherical part angle of 0° ; 3 – working body with a spherical part angle of 5° ; 4 – working body with a spherical part angle of 10°

Из полученных данных (рис. 6) и выражения (2) следует, что при одинаковых режимах работы во время внесения одних и тех же удобрений дальность полета частиц возрастает с увеличением угла схода гранул с рабочего органа.

Как видно из графика, схемы распределения гранул минеральных удобрений серийным и экспериментальными рабочими органами схожи и подчиняются нормальному закону распределения. Однако в сравнении с серийными рабочими органами, большая часть туков у которых распределена в центральной зоне, применение экспериментальных привело к перераспределению гранул минеральных удобрений с центральной зоны по краям.

Обсуждение и заключение

Использование разработанных рабочих органов приводит к увеличению рабочей ширины захвата агрегата на 10,0–22,5 %. В сравнении с серийными

экспериментальные рабочие органы позволяют уменьшить неравномерность внесения гранул минеральных удобрений на 13,4 % за счет их перераспределения с центральной зоны по краям.

Положительные результаты предварительных исследований являются предпосылкой для дальнейшей работы по обоснованию конструктивных и кинематических параметров адаптивного центробежного рабочего органа с последующими испытаниями в полевых условиях.

Применение современных методов проектирования с использованием быстрого прототипирования является очень важным инструментом, позволяющим связать теоретические зависимости с параметрами, полученными практическими исследованиями. Такой подход значительно снижает расходы, так как учитываются все возможные зависимости на этапах проектирования

и выпуска разработанного рабочего органа серийно на производстве.

При современном уровне оснащения машиностроительной отрасли 3D-технологиями в перспективе возможно использование оптимизированных САМ-моделей для производства инновационного продукта не только из пластмасс, как прототип, но и непосредственно из металла. Такая

технология включает в себя печать детали с нуля, что отличает ее от традиционных, где требуется вырезание из заготовки с большим расходом материала в стружку. Экономия материала может достигать до 60 %. При этом большая скорость печати и высокая точность делают эти технологии неотъемлемой частью современного высокотехнологического производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Структурная оценка энергосберегающей технологии возделывания зерновых культур и рабочих органов посевных машин / А. Н. Ларюшин [и др.] // Нива Поволжья. 2011. № 2. С. 72–79. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16356738> (дата обращения: 01.03.2022).
2. Исакова А. Н., Кошелев С. Н. Ресурсосберегающие технологии в растениеводстве [Электронный ресурс] // Главный агроном. 2019. № 3. URL: <https://panor.ru/articles/resursosbergayushchie-tekhnologii-v-rastenievodstve/1488.html> (дата обращения: 01.03.2022).
3. Влияние сельскохозяйственной техники на реализацию потенциала урожайности озимой твердой пшеницы / А. Г. Галаян [и др.] // Новые технологии. 2021. № 17. С. 78–86. doi: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-78-86>
4. Using Resource and Energy-Saving Technologies in Agricultural Production as a Direction of Raising Energy Efficiency of Rural Territories / I. O. Yasnolob [et al.] // Ukrainian Journal of Ecology. 2019. Vol. 9, Issue 1. P. 244–250. URL: <https://www.ujecology.com/articles/using-resource-and-energysaving-technologies-in-agricultural-production-as-a-direction-of-raising-energy-efficiency-of-r.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
5. Капустин С. И. Обоснование уровня технологий полевых культур // Сельскохозяйственный журнал. 2019. № 2. С. 12–19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40082006> (дата обращения: 01.03.2022).
6. The Effect of Different Organic Fertilizers on Yield and Soil and Crop Nutrient Concentrations [Электронный ресурс] / С. Thomas [et al.] // Agronomy. 2019. Vol. 9, Issue 12. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
7. Астахов В. С. Возможный качественный прорыв при дифференцированном внесении гранулированных минеральных удобрений // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 158–161. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37332615> (дата обращения: 01.03.2022).
8. Savci S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment // APCBEE Procedia. 2012. Vol. 1. P. 287–292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.047>
9. Седашкин А. Н., Даськин И. Н., Костригин А. А. Неравномерность внесения удобрений при координатной системе земледелия // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 10. С. 39–40. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/65765> (дата обращения: 01.03.2022).
10. Овчинников В. А., Овчинникова А. В. Рабочий орган для внесения минеральных удобрений // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 13–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32877772> (дата обращения: 01.03.2022).
11. Innovative Technologies and Equipment from “Amazone” Company for Fertilizer Application / V. Vuxmann [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 210. doi: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202021004002>

12. Седашкин А. Н., Костригин А. А., Милюшина Е. А. Способ повышения качества внесения известковых удобрений // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 1. С. 88–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42652389> (дата обращения: 01.03.2022).
13. Припоров Е. В. Прибор настройки однодискового центробежного аппарата // Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 2. С. 181–187. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30160242> (дата обращения: 01.03.2022).
14. Адамчук В. В., Моисеенко В. К. Технические средства нового поколения для посева минеральных удобрений // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 2. С. 15–19. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040207.htm> (дата обращения: 01.03.2022).
15. Рабочий орган для разбрасывания минеральных удобрений : патент 79368 Российская Федерация / Седашкин А. Н. [и др.]. № 2008107503 ; заявл. 26.02.2008 ; опубл. 10.01.2009. 4 с.
16. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений / Н. С. Панферов [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 12. С. 18–24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47470683> (дата обращения: 01.03.2022).
17. Портаков А. Б. Рабочий орган для внесения смесей минеральных удобрений // Научный альманах. 2016. № 4–3. С. 153–155. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26146944> (дата обращения: 01.03.2022).
18. Агрегат для внесения пылящихся известковых удобрений / А. Н. Седашкин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2018. Т. 85, № 6. С. 17–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36808679> (дата обращения: 01.03.2022).
19. Рабочий орган для разбрасывания минеральных удобрений : патент 75532 Российская Федерация / Чаткин М. Н. [и др.]. № 2008112617 ; заявл. 01.04.2008 ; опубл. 20.08.2008. 4 с.
20. Рабочий орган для разбрасывания минеральных удобрений : патент 186301 Российская Федерация / Овчинников В. А., Жалнин Н. А., Овчинникова А. В. № 2018136612 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 15.01.2019. 4 с.
21. Paolini A., Kollmannsberger A., Rank S. Additive Manufacturing in Construction: a Review on Processes, Applications, and Digital Planning Methods [Электронный ресурс] // Additive Manufacturing Journal. 2019. Vol. 30. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100894>
22. Factors for Metal Additive Manufacturing Technology Selection / V. Sobota [et al.] // Journal of Manufacturing Technology Management. 2021. Vol. 32, Issue 9. P. 26–47. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2019-0448>
23. Schniederjans D., Yalcin M. Perception of 3D-Printing: Analysis of Manufacturing Use and Adoption // Rapid Prototyping Journal. 2018. Vol. 24, Issue 3. P. 510–520. doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0056>
24. Performance Evaluation of 3D Printing Technologies: a Review, Recent Advances, Current Challenges, and Future Directions / U. Chadha [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00257-4>

Поступила 03.03.2022; одобрена после рецензирования 05.04.2022; принята к публикации 13.04.2022

Об авторах:

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

Кильмяшкин Евгений Анатольевич, доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, 40252@mail.ru

Князьков Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры основ конструирования механизмов и машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8559-5100>, Researcher ID: AFN-5154-2022, ka13@ro.ru

Овчинникова Алена Владимировна, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-2367>, Researcher ID: O-6853-2018, alena2011ovch@yandex.ru

Жалнин Николай Александрович, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4307-4619>, Researcher ID: AGD-2904-2022, nik.zhalnin2015@yandex.ru

Зыкин Евгений Сергеевич, директор Технологического института филиала Ульяновского ГАУ, профессор кафедры агротехнологий, машин и безопасности жизнедеятельности Ульяновского ГАУ (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, д. 1), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-6865>, Researcher ID: AAM-5482-2021, evg-zykin@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В. А. Овчинников – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, доработка текста.

Е. А. Кильмяшкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов.

А. С. Князьков – литературный и патентный анализ, проведение лабораторных исследований, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста и редактирование текста.

А. В. Овчинникова – проведение лабораторных исследований, визуализация текста.

Н. А. Жалнин – литературный и патентный анализ, обработка результатов исследований.

Е. С. Зыкин – критический анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Laryushin N.P., Machnyev A.V., Larin M.A., Khoryev A.N. [Structural Evaluation of Energy-Saving Technology of Cereal Crops and Working Bodies of Sowing Machines]. *Niva povolzhya*. 2011;(2):72–79. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16356738> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)

2. Iskakova A.N., Koshelev S.N. [Resource-Saving Technologies in Crop Production]. *Glavnyy agronom*. 2019;(3). Available at: <https://panor.ru/articles/resursosberegayushchie-tekhnologii-v-rasteniievodstve/1488.html> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)

3. Galayan A.G., Medvedko S.N., Bondarev A.V., Chundyshko V.Y. Influence of Agricultural Machinery on the Potential Realization of Winter Hard Wheat Yield. *New Technologies*. 2021;(17):78–86. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-78-86>

4. Yasnolob I.O., Chayka T.O., Gorb O.O., et al. Using Resource and Energy-Saving Technologies in Agricultural Production as a Direction of Raising Energy Efficiency of Rural Territories. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019;9(1):244–250. Available at: <https://www.ujecology.com/articles/using-resource-and-energysaving-technologies-in-agricultural-production-as-a-direction-of-raising-energy-efficiency-of-r.pdf> (accessed 01.03.2022).

5. Kapustin S.I. Justification of Field Crop Technology. *Agricultural Journal*. 2019;(2):12–19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40082006> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Thomas C., Acquah G.E., Whitmore A.P., et al. The Effect of Different Organic Fertilizers on Yield and Soil and Crop Nutrient Concentrations. *Agronomy*. 2019;9(12). doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
7. Astakhov V.S. [Possible Quality Breakthrough with Differential Application of Granular Mineral Fertilizers]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2019;(1):158–161. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37332615> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
8. Savci S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. *APCBEE Procedia*. 2012;1:287–292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcbec.2012.03.047>
9. Sedashkin A.N., Daskin I.N., Kostigrin A.A. Irregularity of Fertilizers Application in Conditions of Coordinate Farming System. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2013;(10):39–40. Available at: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/65765> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Ovchinnikov V.A., Ovchinnikova A.V. The Working Body for the Application of Mineral Fertilizers. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;(2):13–16. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32877772> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Buxmann V., Meskhi B., Mozgovoy A., et al. Innovative Technologies and Equipment from “Amazone” Company for Fertilizer Application. *E3S Web of Conferences*. 2020;210. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004002>
12. Sedashkin A.N., Kostigrin A.A., Milyushina E.A. The Way to Improve the Quality of the Application of Lime Fertilizers. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;(1):88–91. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42652389> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Priporov E.V. The Control Device Single-Plate Centrifugal Apparatus. *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2017;(2):181–187. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30160242> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
14. Adamchuk V.V., Moiseenko V.K. [New Generation Technical Means for Mineral Fertilizer Spreading]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2004;(2):15–19. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040207.htm> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
15. Sedashkin A.N., et al. [Working Body for Spreading Mineral Fertilizers]. Patent 79,368 Russian Federation. 2009 January 10. 4 p. (In Russ.)
16. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., et al. Trends in the Development of Machines Fitted with Centrifugal Working Bodies for Surface Application of Solid Mineral Fertilizers. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021;(12):18–24. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47470683> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Portakov A.B. The Working Body for Making of Mineral Fertilizers. *Nauchnyy almanakh*. 2016;(4–3):153–155. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26146944> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Sedashkin A.N., Milyushina E.A., Kostigrin A.A., et al. The Unit for Making Dusty Lime Fertilizers. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;85(6):17–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36808679> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Chatkin M.N., et al. [Working Body for Spreading Mineral Fertilizers]. Patent 75,532 Russian Federation. 2008 August 20. 4 p. (In Russ.)
20. Ovchinnikov V.A., Zhalinin N.A., Ovchinnikova A.V. [Working Body for Spreading Mineral Fertilizers]. Patent 186,301 Russian Federation. 2019 January 15. 4 p. (In Russ.)
21. Paolini A., Kollmannsberger A., Rank S. Additive Manufacturing in Construction: a Review on Processes, Applications, and Digital Planning Methods. *Additive Manufacturing Journal*. 2019;30. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100894>
22. Sobota V., van de Kaa G., Luomaranta T., et al. Factors for Metal Additive Manufacturing Technology Selection. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2021;32(9):26–47. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2019-0448>

23. Schniederjans D., Yalcin M. Perception of 3D-Printing: Analysis of Manufacturing Use and Adoption. *Rapid Prototyping Journal*. 2018;24(3):510–520. doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0056>

24. Chadha U., Abrol A., Vora N.P., et al. Performance Evaluation of 3D Printing Technologies: a Review, Recent Advances, Current Challenges, and Future Directions. *Progress in Additive Manufacturing*. 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00257-4>

Submitted 03.03.2022; approved after reviewing 05.04.2022; accepted for publication 13.04.2022

About the authors:

Vladimir A. Ovchinnikov, 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), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0350-8478>, Researcher ID: O-6834-2018, ovchinnikovv81@yandex.ru

Evgeny A. Kilmyashkin, Associate Professor of the Chair of Basic Designing Mechanisms and Machines National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, 40252@mail.ru

Aleksey S. Knyazkov, Senior Lecturer of the Chair of Basic Designing Mechanisms and Machines National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8559-5100>, Researcher ID: AFN-5154-2022, ka13@ro.ru

Alena V. Ovchinnikova, 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/0000-0003-2081-2367>, Researcher ID: O-6853-2018, alena2011lovch@yandex.ru

Nikolay A. Zhalnin, 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/0000-0003-4307-4619>, Researcher ID: AGD-2904-2022, nik.zhalnin2015@yandex.ru

Evgeny S. Zykin, Director of the Technological Institute of the Ulyanovsk, Branch of the Ulyanovsk State Agrarian University; Professor of the Chair of Agricultural Technology, Machinery and Life Safety, Ulyanovsk State Agrarian University (1 Novy Venets Blvd., Ulyanovsk 432017, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-6865>, Researcher ID: AAM-5482-2021, evg-zykin@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. A. Ovchinnikov – scientific guidance, formulation of the main research concept, formation of conclusions, finalization of the text.

E. A. Kilmyashkin – formulation of the main research concept and conclusions.

A. S. Knyazkov – literary and patent analysis, conducting laboratory research, processing of the experimental results, preparing the initial version of the text and text editing.

A. V. Ovchinnikova – conducting laboratory research, text visualization.

N. A. Zhalnin – literature and patent analysis, processing of the research results.

E. S. Zykin – critical analysis.


All authors have read and approved the final manuscript.



Применение диагностики для исследования эксплуатационной надежности электронных систем управления двигателем автомобиля Skoda

П. В. Сенин, Д. А. Галин, Л. О. Круш 

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

 leonidsgrants@yandex.ru

Аннотация

Введение. В электронных системах управления двигателем происходят физические процессы, часть из которых приводит к износу элементов системы. Опыт эксплуатации и диагностирования автомобилей на станции технического обслуживания показал, что часть автомобилей эксплуатируются с неисправностями, многие из которых в дальнейшем приводят к отказам различных групп сложности. Цель исследования – применить диагностику для определения эксплуатационной надежности и оценки технического состояния электронных систем управления двигателем.

Материалы и методы. Для оценки эксплуатационной надежности современной электронной системы управления двигателем была выбрана партия автомобилей. Экспериментальные исследования были проведены на автомобилях Skoda Octavia с двигателями 1.8 TSI CDAB 152 л.с. Euro5 и CDAA 160 л.с. Euro5. Выборка составила 60 единиц техники. Автомобиль записывался на диагностику, предварительно проводилось техническое обслуживание и компьютерная диагностика. После короткого теста автомобиль снова заезжал на станцию технического обслуживания и подвергался глубокой диагностике электронной системы управления двигателем.

Результаты исследования. Получены результаты исследований надежности основных элементов электронной системы управления двигателем. Можно сделать вывод о том, что большая часть отказов конструктивных элементов электронной системы управления двигателем соответствует исполнительным механизмам системы, имеющим подвижные элементы. Датчики, измеряющие параметры системы, изнашиваются в меньшей степени. Проведен анализ зависимости показателей безотказности регулятора давления топливного насоса по интервалам наработки.

Обсуждение и заключение. Определено, что наименьший ресурсный пробег приходится на свечи зажигания. При этом наиболее частая неисправность возникает у регулятора давления топлива в топливной системе автомобилей с долей в 19,8 % от общего количества. Ресурс данного элемента электронной системы управления двигателем составляет в среднем 125 тыс. км. Доказано, что диагностирование с применением современного технологического оборудования является эффективным.

Ключевые слова: диагностика, давление топлива, форсунка, код неисправности, ЭСУД, электронный блок управления, дроссельная заслонка, топливный насос высокого давления, сканер, рабочие характеристики

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Сенин П. В., Галин Д. А., Круш Л. О., 2022



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

Для цитирования: Сенин П. В., Галин Д. А., Круш Л. О. Применение диагностики для исследования эксплуатационной надежности электронных систем управления двигателем автомобиля Skoda // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 235–248. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.235-248>

Original article

Using Diagnostics to Research the Operational Reliability of Electronic Engine Control Systems of Skoda Car

P. V. Senin, D. A. Galin, L. O. Krush ✉

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

✉ leonidsgrants@yandex.ru

Abstract

Introduction. Some physical processes active in the electronic engine control systems lead to wear and tear of the system elements. Experience in operating and diagnosing vehicles at the service station has shown that there is the operation of vehicles with failures, many of which subsequently lead to malfunctions of different complexities. The purpose of the study is to apply diagnostics for determining the operational reliability and assessing the technical condition of electronic engine control systems.

Materials and Methods. A batch of cars was selected to assess the operational reliability of modern electronic engine control system. There were carried out experimental tests of Skoda Octavia cars with 1.8 TSI CDAB 152 hp Euro5 engine and CDAA 160 hp Euro5 engine. The sample consisted of 60 vehicles. Every vehicle was registered for diagnostics, pre-maintenance and computer diagnostics. After a short test, the vehicle was taken back to the service station and subjected to a detailed diagnosis of the electronic engine control system.

Results. The results of analyzing reliability of the main elements of the electronic engine control system have been obtained. It can be concluded that most of the failures of the structural elements of the electronic engine control system occur within the actuators of the system, which have moving elements, sensors measuring the parameters of the system wear out to a lesser extent. The analysis of dependence of failure rates of the fuel pump pressure regulator on operating time intervals has been carried out.

Discussion and Conclusion. It was determined that the spark plugs have the least mileage lifetime. At the same time, the failure within the fuel pressure regulator of the car fuel system occurs most frequently (19.8% of total). The resource of this element of the electronic engine control system averages 125,000 km. It is proved that diagnostics using modern technological equipment is effective.

Keywords: diagnostics, fuel pressure, injector, fault code, electronic engine control system, electronic control unit, throttle valve, high pressure fuel pump, scanner, performance

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

For citation: Senin P.V., Galin D.A., Krush L.O. Using Diagnostics to Research the Operational Reliability of Electronic Engine Control Systems of Skoda Car. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):235–248. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.235-248>

Введение

Современные автомобили с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в подавляющем большинстве оборудованы электронными блоками управления, входящими в электронную систему управления двигателем (ЭСУД). Они позволяют улучшить показатели двигателя и во многом снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. Электроника оптимизирует состав топливовоздушной смеси на различных режимах работы мотора, точное дозирование топлива в цилиндры, стехиометрический состав заряда. На существующем этапе производства и эксплуатации автомобилей экологические показатели стали приоритетными, что во многом зависит от исправной системы управления двигателем [1].

В системе управления двигателем в процессе эксплуатации возникают различные повреждения (изнашивание, загрязнение, старение). Эти изменения сказываются на параметрах работы ДВС и в конечном счете приводят к потере работоспособности узла в целом [2].

Решение проблемы поддержания работоспособности ЭСУД предусматривает исследование причин возникновения отказов, их влияния на работу двигателя. Наличие такой информации является необходимым условием сохранения работоспособности ЭСУД в эксплуатации [3].

За последнее время качество, эффективность, мощностные, экономические и экологические показатели автомобилей улучшились, но при этом надежность и долговечность остались на прежнем уровне и зачастую значительно ухудшились. Это объясняется удешевлением сырья, использованием биоразлагаемых материалов с ограниченным сроком службы, повышением требований к экологичности, усложнением конструкции и применением

агрегатной замены деталей и узлов при ТО и ремонте [3–5].

Опыт эксплуатации и диагностирования автомобилей на станции технического обслуживания показал, что часть автомобилей эксплуатируются с неисправностями. Многие из них в дальнейшем приводят к отказам различных групп сложности [4–7].

В связи с этим целью исследования является анализ эксплуатационной надежности и оценка технического состояния электронных систем управления двигателем автомобилей с применением компьютерной диагностики.

Обзор литературы

Существующие технологии диагностирования автомобилей с ЭСУД позволяют проводить различные действия для определения параметров функционирования систем и узлов автомобиля. В научных исследованиях ведется активное развитие технологий диагностирования параметров и показателей функционирования ЭСУД. Так, проведен подробный анализ изменения характеристик сгорания топлива в зависимости от изменения параметров впрыска [4]. Данное исследование можно связать с определением пропусков зажигания на автомобилях в зависимости от топливных показателей [5; 6].

Определение параметров работы двигателя возможно при диагностировании по показателям выбросов вредных веществ в выхлопной системе автомобиля. В научных работах показан опыт применения диагностирования по показателям выбросов NOx [8–10]. При этом для анализа выбросов возможно применять различное оборудование, которым определяется как показатель состава выхлопа автомобиля, так и показатели элементов системы ЭСУД. Эффективность определения доказывает актуальность применения данных методов для определения показателей работы ЭСУД автомобиля в целом [11–14].

При этом диагностирование ЭСУД по существующим и разрабатываемым технологиям, включая диагностирование по составу выхлопа, возможно также и на автомобилях с дизельными двигателями [15–17].

В современном мире цифровые технологии применяются и в технологическом оборудовании для диагностирования автомобилей. К примеру, было разработано технологическое оборудование, представленное расходомером с применением микропроцессорной платы. В данном исследовании показана эффективность применения цифровых технологий при диагностировании, так как разработанный расходомер топлива позволяет контролировать эффективность подачи топлива, своевременно обнаруживать скрытые неисправности автомобиля и оценивать качество условий эксплуатации [18].

В качестве применяемого оборудования для диагностирования ЭСУД и других систем автомобиля хорошо зарекомендовало себя технологическое оборудование на основе микропроцессорных плат на базе Arduino Uno с применением современного и редактируемого исходного кода платформы [11–13]. Ранее разработанное технологическое оборудование с применением платформы Arduino Uno показало эффективность применения для диагностирования автомобилей с ЭСУД в условиях технического сервиса [11–13].

Одной из причин, кроме влияния датчиков и устройств из состава ЭСУД, являются возникающие сбои в программном обеспечении электронного блока управления двигателем. В проведенных исследованиях доказано, что наиболее часто возникающая неисправность – это неравномерная работа двигателя в результате сбоя программного обеспечения [16].

Анализ существующих исследований в области диагностирования ЭСУД

показал, что имеющиеся технологии диагностирования, основанные на применении диагностических сканеров с протоколом OBDII, во многом неэффективны из-за постоянного совершенствования системы ЭСУД автомобилей. Поэтому исследование причин отказов современных систем управления двигателем с применением эффективных методик диагностирования и одновременного контроля технического состояния систем ЭСУД будет актуальным.

Материалы и методы

Для точной оценки при диагностировании автомобилей должно быть правильно подобрано оборудование (сканеры, цифровые тестеры, мультиметры), чтобы с достаточной точностью определить причины неисправности и не вызвать нарушение в работе системы ЭСУД. Также диагностирование должно проводиться квалифицированными специалистами, имеющими практические навыки работы [6; 7].

Обычно диагностика проводится на специально оборудованных закрытых постах, участках. Наиболее современной является компьютерная диагностика электронных систем управления автомобиля, где выявляются неисправности электроники, подтвержденные кодами неисправности, записанными в память электронного блока управления (ЭБУ).

Источником информации, как правило, является ЭБУ. Подключаясь к ЭБУ с помощью специализированных устройств, сканеров, возможно выявить основные параметры работы систем автомобиля. Фактически ЭБУ выполняет роль внутреннего тестера неисправностей и событий, а сканер интерпретирует эти данные в графическое изображение на экране и представляет их в презентабельном виде [8; 10].

Современные автомобили состоят из большого количества ЭБУ. Программное обеспечение ЭБУ развивается,

увеличивается внутренний объем памяти, частоты работы процессоров, скорости шин передачи данных и их количество [10].

При диагностировании автомобиля особое внимание необходимо уделить точному описанию выдаваемых кодов неисправностей системами автомобиля. Информация с блоков управления поступает в виде цифрового кода и важно понимать, какая неисправность соответствует данному коду [18–21].

Для оценки надежности современной системы управления двигателем проведены экспериментальные исследования работоспособности ЭСУД автомобиля марки Skoda. Автомобиль записывался на диагностику, предварительно проводились техническое обслуживание (ТО) и компьютерная диагностика. После короткого теста автомобиль снова заезжал на станцию ТО и затем подвергался глубокой диагностике ЭСУД.

Для проведения исследования применялось следующее технологическое оборудование:

1. Диагностические цифровые сканеры для определения неисправностей путем считывания кодов с ЭБУ двигателем, а также для контроля технологических параметров, характеризующих функционирование элементов ЭСУД (ScanDoc, BOSCH KTS, VCDS).

2. Разработанное технологическое оборудование для диагностирования датчиков и топливных систем на основе Arduino Uno [11].

3. Оборудование для определения концентрации вредных выбросов, содержащихся в выхлопе автомобиля (газоанализаторы «Инфракар 5MT-01»).

4. Дополнительное технологическое оборудование и программное обеспечение.

Экспериментальные исследования были проведены на автомобилях Skoda Octavia с двигателем 1.8 TSI CDAB

152 л.с. Euro5 и CDAA 160 л.с. Euro5. Выборка составляла 60 единиц. Выбор данного автомобиля обусловлен доступностью на рынке и популярностью среди владельцев. Также в регионе недоступны дилерские центры данной марки, что также благоприятно сказывается на ее популярности. Предварительно перед проведением исследований замеряли компрессию и проверяли вытяжку цепи газораспределительного механизма.

Результаты исследования

На основе диагностирования и оценки эксплуатационной надежности ЭСУД автомобилей марки Skoda получены результаты исследований надежности основных элементов ЭСУД. Работа выполнялась на станции технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» в г. Саранске в период 2019–2021 гг. Результаты исследования надежности системы ЭСУД представлены в таблице 1.

Основные жалобы на работоспособность автомобилей были связаны с повышенным расходом топлива, длительным запуском, снижением мощности. Многие автомобили не имели возможности самостоятельно перемещаться. Им требовалась услуга эвакуатора. Оценку состояния проводили при полностью заряженной аккумуляторной батарее, чтобы избежать погрешностей в измерениях. Дефектацию неисправных и отказавших узлов проводили как инструментальным методом контроля с помощью сканеров ScanDoc (Qantex), BOSCH KTS, VCDS, мотора-тестера Motodoc, так и органолептической оценкой по внешним признакам и проявлениям. Во многих случаях неисправности присутствовали на автомобилях без внешних признаков.

Анализируя результаты исследования, представленные в таблице 1, можно сделать вывод о том, что большая часть отказов конструктивных

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Показатели надежности элементов электронной системы управления двигателем автомобиля Skoda Octavia

Reliability indicators of the electronic engine control system elements of the Skoda Octavia car

Датчик или исполнительный механизм / Sensor or actuator	Причина возникновения отказа или неисправности / Cause of failure or malfunction	Средняя наработка до отказа, тыс. км / Average operating time to failure, thous. km	Доля отказов, % / Failure ratio, %
1	2	3	4
1. Датчик кислорода (Лямбда зонд 1) / Oxygen sensor (Lambda probe 1)	Обрыв цепи нагревателя. Снижение эффективности работы чувствительного элемента / Heater circuit breakage. Reduced sensing element efficiency	165,2	4,2
2. Датчик кислорода (Лямбда зонд 2) / Oxygen sensor (Lambda probe 2)	Обрыв цепи нагревателя. Снижение эффективности работы чувствительного элемента, в том числе вследствие повреждения каталитического нейтрализатора / Heater circuit breakage. Reduced sensing element efficiency, including that resulting from the catalytic converter damages	148,1	6,1
3. Каталитический нейтрализатор / Catalytic converter	Разрушение, снижение эффективности / Destruction, reduced efficiency	175,5	6,2
4. Датчик массового расхода воздуха / Mass air flow sensor	Снижение эффективности / Reduced efficiency	148,3	5,3
5. Электромагнитный клапан регулирования фаз / Electromagnetic phase control valve	Износ, повреждение соленоида / Wear, damage of the solenoid	165,4	5,7
6. Электромагнитная топливная форсунка / Electromagnetic fuel injector	Засорение распылителя, межвитковые замыкания в цепи катушки / Atomizer clogging, turn-to-turn short circuits in the coil circuit	138,3	4,8
7. Регулятор давления топлива / Fuel pressure regulator	Износ, загрязнение, задиры на штоке / Wear, pollution, tearings up on the stock	141,6	19,8
8. Топливный насос / Fuel pump	Износ, обрыв цепи проводника / Wear, conductor circuit breakage	112,8	6,6
9. Электронная дроссельная заслонка / Electronic throttle valve	Износ потенциометра / Potentiometer wear	94,4	7,6
10. Катушка зажигания / Ignition coil	Обрыв цепи обмотки / Winding circuit breakage	96,4	6,4

Окончание таблицы 1 / End of table 1

1	2	3	4
11. Свеча зажигания / Spark plug	Износ электродов вследствие повышенного расхода масла. Разрушение или пробой изолятора / Wear of the electrodes resulted from increased oil consumption. Destruction or breakdown of the insulator	48,6	5,8
12. Турбокомпрессор / Turbocharger	Износ опорных подшипников / Wear of the support bearings	125,8	3,2
13. Клапан регулятор давления наддува / Valve boost pressure regulator	Нарушение герметичности / Break of tightness	134,4	2,1
14. Электронный блок управления двигателем ECU / Electronic engine control unit ECU	Перегорание дорожек платы вследствие короткого замыкания в цепях датчиков и исполнительных механизмов / Burnout of the board tracks resulted from short circuit fault in the circuits of sensors and actuators	172,2	2,4
15. Остальные узлы / Other nodes			13,8

элементов ЭСУД соответствует исполнительным механизмам системы, имеющим подвижные элементы (электронная дроссельная заслонка, катушка зажигания, топливный насос, регулятор давления топлива). Датчики, измеряющие параметры системы, изнашиваются в меньшей степени [14–16].

Пример нарушения работоспособного состояния топливного насоса высокого давления автомобиля Skoda Octavia с двигателем 1.8 TSI представлен на рисунке 1. На рабочем штоке заметны характерные задиры и повреждения вследствие механического воздействия абразива, скапливающегося на поверхности штока, температурных режимов работы, качества смазочного материала и нарушения целостности уплотнительных элементов.

Определить данное повреждение внешним осмотром, не разбирая узел, не представлялось возможным.

Изношенный шток способствовал утечкам и попаданию топлива в систему смазки двигателя. Происходило разжижение масла и формирование богатой смеси в рабочем пространстве кислородного датчика. На это указывал код неисправности P0172, периодически появляющийся в памяти ЭБУ. При этом заметной потери мощности не наблюдалось, но контроллер информировал через приборную панель о низком среднем часовом расходе топлива и о переобогащении топливовоздушной смеси.

При игнорировании данного диагностического сообщения последствия стали бы негативными для состояния двигателя и его остаточного ресурса: слишком жидкое масло привело бы к нарушению смазки в трущихся узлах и повреждению двигателя. Невнимательное отношение к диагностическим сообщениям может стать причиной дорогостоящего ремонта автомобиля.



Р и с. 1. Шток топливного насоса высокого давления BOSCH 0261520472 со следами износа
 F i g. 1. BOSCH 0261520472 high pressure fuel pump rod with signs of wear

Также оценка технического состояния топливного насоса высокого давления проводилась по параметрам развиваемого давления в режиме холостого хода и повышенных оборотов. Данные параметры сравнивались с табличными значениями, установленными для конкретного типа ЭСУД и версии программного обеспечения. Для топливного насоса высокого давления (ТНВД) BOSCH 0261520472 в режиме холостого хода параметры работы должны соответствовать запрашиваемому системой давлению 40 бар.

Дальнейшие исследования проводились по основным показателям, характеризующим надежность любой технической системы. Наряду со средней наработкой на отказ так же внимание уделялось параметрам вероятности безотказной работы $P(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ по интервалам наработки. Расчеты этих показателей по

результатам исследований эксплуатационной надежности ЭСУД выполнены по всем основным ее элементам с помощью программы Microsoft Office Excel.

В качестве примера в таблице 2 представлены показатели безотказности регулятора давления ТНВД по интервалам наработки.

Графическое представление изменения интенсивности отказов $\lambda(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$ элемента ЭСУД по наработке показано на рисунках 2, 3.

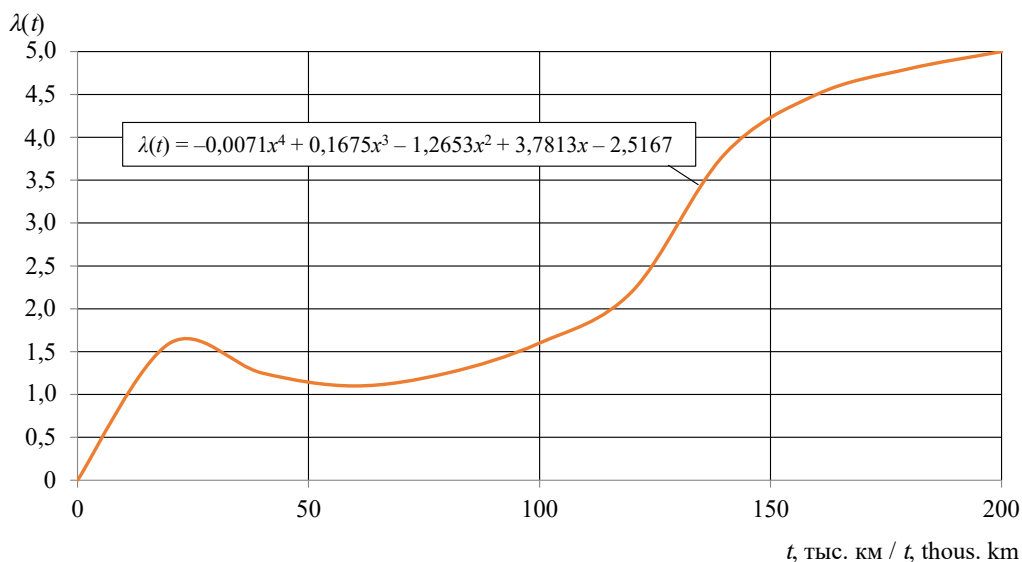
Вероятность безотказной работы элемента находили исходя из выражения для каждого интервала наработки:

$$P(t) = N(t) / N_0, \quad (1)$$

где N_0 – количество изделий, работавших в данный промежуток; $N(t)$ – количество исправных изделий в конце отрезка.

Показатели безотказности регулятора давления топлива по наработке
Reliability indicators of the fuel pressure regulator by operating time

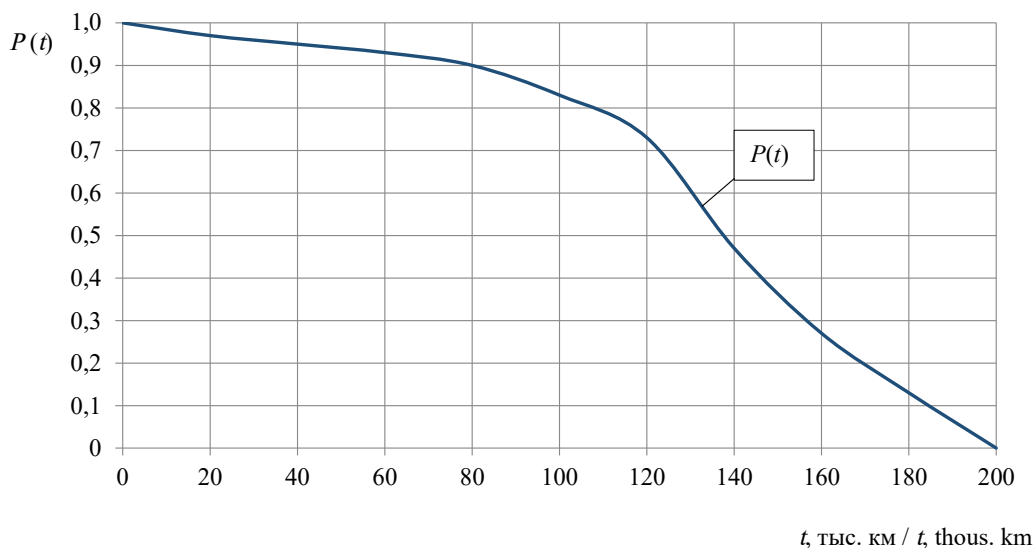
Показатель / Indicator	Наработка, тыс. км / Operating time, thous. km									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Число отказов $n(\Delta t)$ / Number of failures $n(\Delta t)$	2	1	1	2	4	6	16	12	8	8
Интенсивность отказов $\lambda(t)$, 10^4 1/тыс.км / Failure rate $\lambda(t)$, 10^4 1/thous. km	1,60	1,24	1,10	1,25	1,60	2,20	3,80	4,50	4,80	5,00
Вероятность безотказной работы $P(t)$ / Probability of uptime $P(t)$	0,97	0,95	0,93	0,90	0,83	0,73	0,47	0,27	0,13	0



Р и с. 2. Изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ регулятора давления топлива по наработке
F i g. 2. Change in the failure ratio $\lambda(t)$ of the fuel pressure regulator by operating time

Анализ приведенной зависимости показал, что после достижения наработки 125 тыс. км интенсивность отказов такого элемента топливной

системы, как регулятор давления топлива $\lambda(t)$, начинает вырастать, а вероятность безотказной работы снижаться до значения $P(t) = 0,47$.



Р и с. 3. Снижение вероятности безотказной работы регулятора давления топлива по наработке
 F i g. 3. Reducing the probability of failure-free operation of the fuel pressure regulator by operating time

К прогнозируемой наработке происходит засорение штока вследствие загрязнения, что приводит к износу штока и в конечном итоге потере работоспособности узла.

Отказы элементов системы управления двигателем оказывают большое влияние на ряд показателей работы (мощность, расход топлива, вредные выбросы в окружающую среду и т. д.). При отказах таких основных элементов, как топливный насос низкого и высокого давления и датчики положения, запуск двигателя блокируется ЭСУД.

Обсуждение и заключение

Для предупреждения отказов ЭСУД при проведении работ по техническому обслуживанию и диагностированию автомобилей необходимо выявлять состояние элементов данных систем и при необходимости устранять неисправности.

Согласно рекомендациям производителя автомобиля предусмотрена проверка памяти кодов неисправностей в ЭБУ. При их наличии требуется

выполнять необходимые контрольно-диагностические операции. При отсутствии кодов неисправностей ЭСУД признается технически исправной и дополнительные проверки не проводятся. В результате при выполнении технического обслуживания пропускается значительное число не выявленных в ЭСУД скрытых неисправностей, что приводит к росту отказов этих систем в эксплуатации.

По результатам анализа таблиц 1, 2 был сделан вывод, что наименьший ресурсный пробег приходится на свечи зажигания, входящие в состав ЭСУД. При этом наиболее частая неисправность возникает у регулятора давления топлива в топливной системе автомобилей с долей 19,8 % от общего количества. Ресурс данного элемента ЭСУД, определенный в результате вычисления и представленный на рисунках 2, 3, составляет в среднем 125 тыс. км.

Проведенные исследования с использованием компьютерной диагностики позволили оценить состояние ЭСУД

автомобилей Skoda, эксплуатируемых в регионе. На основании анализа причин возникновения отказов и неисправностей даны рекомендации по проведению диагностики системы ЭСУД при посещении станции ТО для предупреждения возникновения сложных отказов и неисправностей по собственной методике оценки с использованием современных сканеров, механических тестеров, специальных диагностических программ и иного оборудования.

Подводя итог, можно сделать вывод, что применение технологий диагностирования с использованием технологического оборудования для определения неисправностей позволяет определять ресурсные показатели элементов ЭСУД. Данная методика является актуальной и эффективной при применении на автомобилях, включающих современные цифровые технологии и электронные системы управления двигателем автомобиля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Methods to Investigate the Importance of eFuel Properties for Enhanced Emission and Mixture Formation [Электронный ресурс] / J. Villforth [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0017>
2. Komorska I., Wołczyński Z, Boreczuch A. Diagnosis of Sensor Faults in a Combustion Engine Control System with the Artificial Neural Network // Diagnostyka. 2019. Vol. 20, Issue 4. P. 19–25. doi: <https://doi.org/10.29354/diag/110440>
3. Control and Optimization of Spark Ignition–Controlled Auto-Ignition Hybrid Combustion Based on Stratified Flame Ignition / T. Chen [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2019. Vol. 233, Issue 12. P. 3057–3073. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407018817626>
4. Effect of Diesel Injection Strategies on Natural Gas/Diesel RCCI Combustion Characteristics in a Light Duty Diesel Engine / K. Poorghasemi [et al.] // Applied Energy. 2017. Vol. 199. P. 430–446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.011>
5. Detection of Engine Misfire Using Characteristic Harmonics of Angular Acceleration / Q. Song [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2019. Vol. 233, Issue 14. P. 3816–3823. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019834104>
6. Experimental and Numerical Investigation for Improved Mixture Formation of an eFuel Compared to Standard Gasoline [Электронный ресурс] / E. Rossi [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0019>
7. Misfire Detection of Diesel Engine Based on Convolutional Neural Networks / P. Zhang [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2021. Vol. 235, Issue 8. P. 2148–2165. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020987077>
8. Kannadhasan A. Self Diagnostic Cars: Using Infotainment Electronic Control Unit [Электронный ресурс] // SAE Technical Papers. 17th Symposium on International Automotive Technology. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-26-0027>
9. Concept Analysis and Initial Results of Engine-Out NO_x Estimator Suitable for on ECM Implementation [Электронный ресурс] / D. Kihias [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 2016 World Congress and Exhibition. 2016. doi: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0611>
10. Price K. S., Wang L., Pauly T. Evaluation of Field NO_x Performance of Diesel Vehicles Using ECM - Provided OBD/SAEJ1979 Data [Электронный ресурс] // SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1067>
11. Круш Л. О., Галин Д. А. Разработка устройства для определения магнитного поля на базе микроконтроллера Arduino Uno // Сурский вестник. 2021. Т. 13, № 1. С. 47–51. doi: https://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_13_01_009

12. Azizahwati A., Rahmad M., Hidayat F. Development of a Circular Motion Experimental Device Using an Arduino Uno Microcontroller [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series. Universitas Riau International Conference on Science and Environment (11–13 September 2020). Vol. 1655. Pekanbaru, 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012154>
13. Takeuchi Y., Oike H., Ishikawa T. Development of Motor Health Examination System Using Arduino Uno [Электронный ресурс] // 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (24–27 November 2020). Hamamatsu, 2020. doi: <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9290982>
14. Model-Based Development and OBD Calibration for Heavy-Duty Applications / R. Rezaei [et al.] // Proceedings of China SAE Congress 2020: Selected Papers. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 769. Springer : Singapore, 2020. P. 753–770. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2090-4_45
15. Mirmohammadsadeghi M., Zhao H., Ito A. Optical Study of Gasoline Substitution Ratio and Diesel Injection Strategy Effects on Dual-Fuel Combustion // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2020. Vol. 234, Issue 4. P. 1075–1097. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019864013>
16. Extracting Event Data from Memory Chips within a Detroit Diesel DDEC v [Электронный ресурс] / J. Daily [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1450>
17. Krogerus T. R., Hyyönönen M. P., Huhtala K. J. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Diesel Fuel Injection Systems [Электронный ресурс] // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2016. Vol. 138, Issue 8. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4032417>
18. Krivoshepov S. Development of a Piston Fuel Flow Meter Based on a Microcontroller and Its Use for Vehicle Diagnostics // SAE Technical Papers. SAE 2021 Powertrains, Fuels and Lubricants Digital Summit, FFL. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-01-1150>
19. Selvam H. P., Shekhar S., Northrop W. F. Prediction of NOx Emissions from Compression Ignition Engines Using Ensemble Learning-Based Models with Physical Interpretability [Электронный ресурс] // SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0082>
20. Real Time Energy Management Control Strategies for an Electrically Supercharged Gasoline Hybrid Vehicle [Электронный ресурс] / F. Accurso [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 2020 World Congress Experience, WCX. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-1009>
21. Combined CFD – Experimental Analysis of the In-Cylinder Combustion Phenomena in a Dual Fuel Optical Compression Ignition Engine [Электронный ресурс] / R. De Robbio [et al.] // SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0012>

Поступила 09.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 20.04.2022

Об авторах:

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

Галин Дмитрий Александрович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, Researcher ID: AGA-8511-2022, dagalin@yandex.ru

Круш Леонид Олегович, аспирант 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/0000-0002-0876-0739>, Researcher ID: AGA-8642-2022, leonidgrants@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

П. В. Сенин – научное руководство, разработка технического задания на исследование.

Д. А. Галин – проведение научного исследования, подготовка текста, математический расчет, анализ результатов исследования.

Л. О. Круш – подготовка и анализ литературных данных, проведение научного исследования, анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Villforth J., Kulzer A.C., Deeg H.-P., et al. Methods to Investigate the Importance of eFuel Properties for Enhanced Emission and Mixture Formation. In: SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0017>
2. Komorska I., Wolczyński Z, Borczech A. Diagnosis of Sensor Faults in a Combustion Engine Control System with the Artificial Neural Network. *Diagnostyka*. 2019;20(4):19–25. doi: <https://doi.org/10.29354/diag/110440>
3. Chen T., Wang X., Zhao H., et al. Control and Optimization of Spark Ignition–Controlled Auto-Ignition Hybrid Combustion Based on Stratified Flame Ignition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019;233(12):3057–3073. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407018817626>
4. Poorghasemi K., Saray R.K., Ansari E., et al. Effect of Diesel Injection Strategies on Natural Gas/Diesel RCCI Combustion Characteristics in a Light Duty Diesel Engine. *Applied Energy*. 2017;199:430–446. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.011>
5. Song Q., Gao W., Zhang P., et al. Detection of Engine Misfire Using Characteristic Harmonics of Angular Acceleration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019;233(14):3816–3823. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019834104>
6. Rossi E., Hummel S., Cupo F., et al. Experimental and Numerical Investigation for Improved Mixture Formation of an eFuel Compared to Standard Gasoline. In: SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0019>
7. Zhang P., Gao W., Li Y., Wang Y. Misfire Detection of Diesel Engine Based on Convolutional Neural Networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2021;235(8):2148–2165. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020987077>
8. Kannadhasan A. Self Diagnostic Cars: Using Infotainment Electronic Control Unit. In: SAE Technical Papers. 17th Symposium on International Automotive Technology. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-26-0027>
9. Kihias D., Khaled N., Kihias D., et al. Concept Analysis and Initial Results of Engine-Out NOx Estimator Suitable for on ECM Implementation. In: SAE Technical Papers. SAE 2016 World Congress and Exhibition. 2016. doi: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0611>
10. Price K.S., Wang L., Pauly T. Evaluation of Field NOx Performance of Diesel Vehicles Using ECM - Provided OBD/SAEJ1979 Data. In: SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1067>
11. Krush L.O., Galin D.A. Development of a Device for Determining the Magnetic Field Based on Arduino Uno Microcontroller. *Sura Bulletin*. 2021;13(1):47–51. (In Russ.) doi: https://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_13_01_009
12. Azizahwati A., Rahmad M., Hidayat F. Development of a Circular Motion Experimental Device Using an Arduino Uno Microcontroller. In: Journal of Physics: Conference Series. Universitas Riau International Conference on Science and Environment (11–13 September 2020). Vol. 1655. Pekanbaru; 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012154>
13. Takeuchi Y., Oike H., Ishikawa T. Development of Motor Health Examination System Using Arduino Uno. In: 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (24–27 November 2020). Hamamatsu; 2020. doi: <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9290982>

14. Rezaei R., Schwalbe J., Weber M., et al. Model-Based Development and OBD Calibration for Heavy-Duty Applications. In: Proceedings of China SAE Congress 2020: Selected Papers. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 769. Springer: Singapore; 2020. p. 753–770. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2090-4_45
15. Mirmohammadsadeghi M., Zhao H., Ito A. Optical Study of Gasoline Substitution Ratio and Diesel Injection Strategy Effects on Dual-Fuel Combustion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2020;234(4):1075–1097. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407019864013>
16. Daily J., Kongs A., Johnson J., Corcega J. Extracting Event Data from Memory Chips within a Detroit Diesel DDEC v. In: SAE Technical Papers. SAE 2015 World Congress and Exhibition. 2015. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1450>
17. Krogerus T.R., Hyvönen M.P., Huhtala K.J. A Survey of Analysis, Modeling, and Diagnostics of Diesel Fuel Injection Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016;138(8). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4032417>
18. Krivoschapov S. Development of a Piston Fuel Flow Meter Based on a Microcontroller and Its Use for Vehicle Diagnostics. In: SAE Technical Papers. SAE 2021 Powertrains, Fuels and Lubricants Digital Summit, FFL. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-01-1150>
19. Selvam H.P., Shekhar S., Northrop W.F. Prediction of NOx Emissions from Compression Ignition Engines Using Ensemble Learning-Based Models with Physical Interpretability. In: SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0082>
20. Accurso F., Zanelli A., Rolando L., Millo F. Real Time Energy Management Control Strategies for an Electrically Supercharged Gasoline Hybrid Vehicle. In: SAE Technical Papers. SAE 2020 World Congress Experience, WCX. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-1009>
21. De Robbio R., Cameretti M.C., Mancaruso E., et al. Combined CFD – Experimental Analysis of the In-Cylinder Combustion Phenomena in a Dual Fuel Optical Compression Ignition Engine. In: SAE Technical Papers. SAE 15th International Conference on Engines and Vehicles, ICE. 2021. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-24-0012>

Submitted 09.03.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 20.04.2022

About the authors:

Petr V. Senin, Head of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: [H-1219-2016](https://orcid.org/H-1219-2016), senin53@mail.ru

Dmitriy A. Galin, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2858-2685>, Researcher ID: [AGA-8511-2022](https://orcid.org/AGA-8511-2022), dagalin@yandex.ru

Leonid O. Krush, Postgraduate Student of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0876-0739>, Researcher ID: [AGA-8642-2022](https://orcid.org/AGA-8642-2022), leonidsgrants@yandex.ru

Contribution of the authors:

P. V. Senin – scientific guidance, development of the terms of reference for the study.

D. A. Galin – conducting scientific research, text preparation, mathematical calculation, analysis of the research results.

L. O. Krush – preparation and analysis of literary data, conducting scientific research, analysis of the results.

All authors have read and approved the final manuscript.

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.354.026

doi: 10.15507/2658-4123.032.202202.249-262

Научная статья



Динамика фракционного состава зерносоломистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна

Э. В. Жалнин, М. Е. Чаплыгин ✉

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)*✉ misha2728@yandex.ru

Аннотация

Введение. В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов обмолота и сепарации в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна с цифровой оценкой фракционного состава обмолачиваемого зерносоломистого материала. Полученные данные позволяют выявить динамику фракционного состава зерносоломистой массы, обмолачиваемой в молотильном зазоре молотильного аппарата в зависимости от ее подачи.

Материалы и методы. Исследования проводили на специальном стенде в виде отдельного блока молотильного аппарата комбайна. Под каждой секцией подбарабья были установлены пробоотборники. Подачу массы меняли в пределах от 1,0 до 6,0 кг/с при коэффициенте солоmistости 1:1. Полученные данные аппроксимировали по стандартной методике.

Результаты исследования. Найдено количество зерна и соломы, прошедшее через решетку подбарабья, и остальной части, поступающей на соломосепаратор, в зависимости от начального их количества. Для каждой фракции определено отношение массы соломы к массе зерна, плотность и толщина слоя зерносоломистого вороха на стрясной доске перед решетками и в начале клавиш соломосепаратора. Получена динамика сепарации зерна и соломы по разрезке длины подбарабья с определением плотности и степени сжатия слоя зерносоломистой смеси в молотильном зазоре.

Обсуждение и заключение. Установлено, что в ворохе, прошедшем через подбарабья, отношение массы соломы к массе зерна уменьшается с 0,46 до 0,27, плотность увеличивается с 60,1 до 84,0 кг/м³. В ворохе, попавшем на соломосепаратор, отношение массы соломы к массе зерна уменьшается с 11,2 до 2,0, плотность увеличивается в небольших пределах от 21,7 до 26,4 кг/м³. Толщина слоя вороха на стрясной доске перед решетками очистки изменяется в пределах 0,25–10,2 см, а на соломотрясе – от 2,2 до 19,8 см при изменении подачи общей массы на обмолот от 1 до 6 кг/с.

Ключевые слова: зерносоломистый ворох, молотильный барабан, сепарация, плотность, толщина слоя, аппроксимация

© Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е., 2022



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

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Динамика фракционного состава зерносоломистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 249–262. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>

Original article

Dynamics of Fractional Composition of Grain-and-Straw Mass Being Threshed in the Threshing Mechanism of a Combine Harvester

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 theoretical and experimental studies of threshing and separation processes in the threshing mechanism of the combine harvester with a digital assessment of the fractional composition of the grain-and-straw material being threshed. The obtained data will allow detecting dynamics of fractional composition of grain-and-straw mass being threshed in the threshing gap of the threshing mechanism depending on its supply.

Materials and Methods. The research was carried out on a special stand in the form of a separate unit of the combine threshing mechanism. Grain-and-straw samplers were installed under each threshing section. The mass feed was changed from 1.0 to 6.0 kg/s at a straw ratio of 1:1. The obtained data were approximated using a standard procedure.

Results. There was determined the amount of grain and straw passed through the threshing section screen and the rest of grain and straw entering the straw separator depending on their initial amount. For each fraction, there were determined the ratio of straw mass to grain mass, the density and thickness of the grain-and-straw heap layer on the shaking board ahead of the grates and at the beginning of the straw separator keys. The dynamics of grain-and-straw separation was identified by scanning the length of the grains with the determination of the density and compression degree of the grain-and-straw mixture layer in the threshing gap.

Discussion and Conclusion. It was found that in the heap of grain-and-straw passed through a threshing section, the ratio of straw mass to grain mass decreases from 0.46 to 0.27 and density increases from 60.1 to 84.0 kg/m³. In the heap of grain-and-straw that fell on the straw separator, the ratio of the straw mass to the grain mass decreases from 11.2 to 2.0, the density increases within a small range from 21.7 to 26.4 kg/m³. Thickness of the heap layer on the shaking board in front of the cleaning sieves varies in the range 0.25–10.20 cm, and on the straw walker – 2.2–19.8 cm when changing the supply of the total mass for threshing from 1 to 6 kg/s.

Keywords: grain-and-straw heap, threshing drum, separation, density, layer thickness, approximation

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

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

For citation: Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Dynamics of Fractional Composition of Grain-and-Straw Mass Being Threshed in the Threshing Mechanism of a Combine Harvester. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):249–262. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>



Введение

Проблема увеличения производства зерна по-прежнему остается ключевой в сельскохозяйственном производстве. Решение зерновой проблемы позволит существенно ослабить или полностью снять напряженность с продовольствием, отказаться или свести к минимуму закупки зерна за рубежом, реализовать потенциальные возможности экспорта высококачественного товарного зерна. В совокупности это создает условия для продовольственной безопасности страны.

Основная доля затрат при производстве зерновых культур приходится на уборку урожая (50–55 %). Из этого следует, что для развития механизации уборочных работ необходимо обеспечить энергоемкость зерноуборочных комбайнов в пределах 20–23 кВт на единицу пропускной способности. Вместе с тем от способов и применяемых технологий уборки урожая зерновых культур во многом зависят условия закладки урожая будущего года.

Технологический процесс обмолота хлебной массы молотильным аппаратом призван обеспечить максимальный вымолот, сепарацию (выделение из основной соломистой массы) и автономную подачу зерна на доработку [1; 2].

Процессу обмолота хлебной массы молотильным аппаратом различных конструкций посвящено достаточно много теоретических и экспериментальных исследований. Однако изучение процесса обмолота хлебной массы концентрируется на двух проблемах: обмолот и сепарация [3]. При этом основное внимание уделяется механико-технологическим процессам, которые включают динамические и технологические параметры движения растительной массы в рабочем пространстве «барабан – дека», процессам обмолота и сепарации элементов зерносоломистого вороха, элементам динамики молотильного

барабана, оптимизации некоторых параметров молотильных устройств и общим закономерностям технологического процесса обмолота [4].

Однако не было обнаружено результатов исследования процесса сепарации зерна и соломы в широком диапазоне подач хлебной массы на обмолот и в одних условиях с определением количественного соотношения разных фракций этой массы, их плотности с аппроксимацией зависимостей параметров сепарации от исходной подачи. К тому же была слабо изучена интенсивность сепарации соломистых частиц.

Цель исследования – выявить характер изменения параметров фракционного состава обмолачиваемого зерносоломистого вороха, получить аппроксимирующие уравнения в зависимости от подачи массы в молотильный аппарат и рассчитать плотность вороха, прошедшего через подбарабанье на решетку очистки, вышедшего из молотильного зазора на соломотряс, а также находящегося в самом молотильном зазоре, вышедшего из него и попавшего на начало соломотряса.

Обзор литературы

Исследования технологических процессов обмолота и сепарации рабочими органами зерноуборочного комбайна, и в частности молотильного аппарата, проводятся как отечественными, так и зарубежными специалистами.

В исследованиях установлено, что главным рабочим органом зерноуборочного комбайна, определяющим его производительность и качество работы, является молотильный аппарат. Разработаны конструкции молотильных аппаратов. Несмотря на разнообразие, только три закономерности определяют уровень их технологического совершенства: количество выделяемого свободного зерна и соломы через сепарирующую решетку (деку), дробление зерна и изменение энергозатрат

в зависимости от исходной подачи массы в комбайн. Большинство публикаций посвящено именно этим трем закономерностям.

В определении В. П. Горячкина технологический процесс обмолота отражает сочетание двух стадий: свободный удар на входе и последующее перетираение в уменьшающихся зазорах между бичами барабана и планками подбарабанья¹. При этом подразумевается, что интенсивность сепарации обмолоченного зерна соответствует интенсивности его обмолота.

Первые фундаментальные теоретико-экспериментальные исследования по процессам обмолота и сепарации провел М. А. Пустыгин². Он установил, что основными показателями технологического процесса, осуществляемого в молотильном аппарате, являются полнота вымолота зерна, степень его сепарации через сепарирующую решетку деки и величина повреждения зерна [5]. Эти показатели оказывают влияние на конечную оценку работы молотилки комбайна – его пропускную способность³. Пропускная способность молотилки зерноуборочного комбайна определяется величиной потерь зерна (1,5 %), дроблением (2 %) и чистотой (95 %) бункерного зерна [6–8]. Позднее это дало возможность классифицировать все комбайны мира на классы по пропускной способности: от 1,0 до 16 кг/с, практически через каждые 1,5–2,0 кг/с. Этот разрыв вполне компенсируется шириной захвата жатки комбайна и скоростью его движения [9].

Потери зерна за молотилкой комбайна складываются из потерь свободного зерна и недомолота в соломе в сходах с клавишного соломосепаратора и соломе в сходах с очистки. Величина этих потерь при оптимальной подаче

хлебной массы в молотилку комбайна распределяется в среднем следующим образом: 50 % свободного зерна и 20 % недомолота в соломе, 20 % свободного зерна и 10 % недомолота в полове [10]. Основная доля потерь зерна приходится на потери свободного зерна в соломе, которые являются следствием достаточно низкой сепарирующей способности молотильного аппарата. Сепарация зерна в молотильном аппарате на оптимальных подачах достигает 90–95 %, в то время как обмолот при этом достигает 98–99 %. Низкая сепарирующая способность клавишного соломосепаратора (80–85 % от поступившего на него зерна) приводит к тому, что потери свободного зерна в соломе составляют 40–45 % от общих потерь за молотилкой. Устранение этого недостатка возможно путем интенсификации процесса сепарации зерна в молотильном аппарате или в клавишном соломосепараторе. Предпочтение должно отдаваться в первую очередь интенсификации процесса сепарации в молотильном аппарате, так как именно в нем находятся истоки процесса сепарации обмолоченного зерна.

Процесс сепарации зерна начинается сразу: со входом хлебной массы в молотильный аппарат, в котором содержится до 30 % зерна, обмолоченного шнеком жатки и питающим транспортером наклонной камеры. Однако процесс сепарации развивается медленнее, по сравнению с процессом обмолота зерна, вследствие того, что в зоне входа еще сравнительно велика толщина слоя потока хлебной массы и его плотность. Такое состояние массы не обеспечивает беспрепятственное прохождение свободного зерна в нижние слои потока. Поэтому наибольшую интенсивность процесс сепарации приобретает

¹ Горячкин В. П. Земледельческая механика. ПСС. М. : Сельхозгиз, 1937–1949. Т. 1–7.

² Пустыгин М. А. Теория и технологический расчет молотильных устройств. М. : Сельхозгиз, 1948.

³ Там же.

несколько позднее, чем процесс обмо­лота. Затем интенсивность сепарации зерна падает, и определяющую роль начинает играть длина сепарирующей поверхности или улучшение условий сепарации.

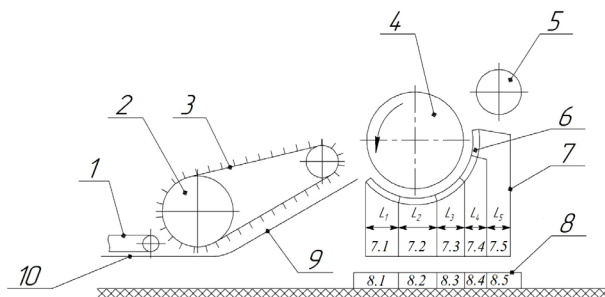
Ряд работ получил наибольшее при­знание среди ученых⁴ [11–13]. В результате исследований была уточнена терминология, предложены уравнения, проведено математическое моделиро­вание при варьировании факторов и па­раметров обмолачиваемого материала, определены методы расчета параметров молотильных аппаратов, сформули­рованы требования к ним по потерям и дроблению зерна [14–17]. Стоит вы­делить исследования Э. И. Липковича и С. А. Алферова. Первый исследовал процессы обмо­лота и сепарации в функ­ции времени движения обмолачиваемо­го материала по решетке подбарабанья, второй – по пути ее движения⁵ [18]. В предложенных ими уравнениях ин­тенсивность сепарации зерна связана

с интенсивностью вымолота зерна из колоса [19–21].

Материалы и методы

В ходе исследования был применен экспериментально-теоретический ме­тод. Эксперимент проводили на специ­альном стенде (рис. 1)

Молотильный аппарат с наклонной камерой был взят от серийного комбайна типа СК-5М «Нива», который был по­ставлен на специальные стойки. Перед наклонной камерой был установлен по­лотенно-планчатый транспортер, подаю­щий хлебную массу в наклонную камеру. Хлебная масса представляла собой есте­ственные стебли с колосом, скошенные на высоте среза 15–20 см. Стебли равно­мерным слоем укладывали на транспор­тер колосом вперед. Подбарабанье было выполнено из пяти секций. Секции друг от друга в нижней своей части раздели­ли эластичными шторами. Под каждой секцией устанавливали пробоотбор­ник, что позволило изучить зональную сепарацию по длине подбарабанья.



Р и с. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда для исследования процессов обмо­лота и сепарации в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна: 1 – подающий транспортер; 2 – наклонная камера; 3 – планчатый транспортер; 4 – молотильный барабан; 5 – отбойный битер; 6 – секции подбарабанья; 7 – секционные шторы; 8 – лотки пробоотборников; 9 – поддон наклонной камеры; 10 – направляющий щиток

F i g. 1. Schematic diagram of the laboratory stand for the investigation of threshing and separation processes in the threshing mechanism of the combine harvester: 1 – feeder conveyor; 2 – inclined chamber; 3 – slat conveyor; 4 – threshing drum; 5 – beater; 6 – threshing sections; 7 – sectional curtains; 8 – sample trays; 9 – inclined chamber tray; 10 – guiding board

⁴ Кленин Н. И., Сакун В. А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. Элементы тео­рии рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Колос, 1980. 671 с.

⁵ Липкович Э. И. Аналитические основы системы машины. Ростов-на-Дону : Ростовское книж­ное издательство, 1983. 112 с.

Технологическая схема распределения разных фракций обмолачиваемой массы представлена на рисунке 2.

Подачу зерносомолистой массы в молотильный барабан изменяли от 1,0 до 6,0 кг/с через каждые 1,0 кг/с при исходном соотношении массы соломы к массе зерна $\alpha_0 = \frac{M_3}{M_c} = 1 : 1$. Диапазон подач 1–3 кг/с очень важен для оценки работы селекционно-семеноводческих комбайнов.

Соответственно, для фракций, прошедших через подбарабанье, $\alpha_n = \frac{Y_3}{Y_c}$, попавших на соломотряс, $\alpha_c = \frac{Y'_3}{Y'_c}$, находящихся в молотильном зазоре, $\alpha_m = \frac{M_{пс}}{M_{мз}}$.

Следовательно, $M_3 = Y_3 + Y'_3$, а $M_c = Y_c + Y'_c$. Опыты проводили в 3 повторностях. Аппроксимацию опытных данных проводили по компьютерной программе.

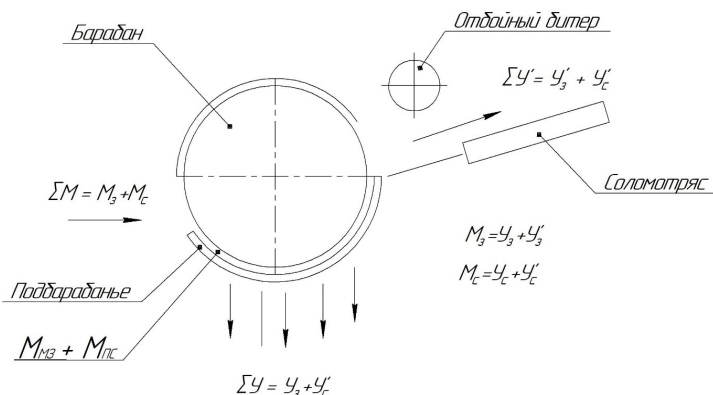
Плотность фракций определили по уравнению (1), полученному в работе Э. В. Жалнина и А. Н. Савченко:

$$\gamma_m = \frac{(1 + \alpha)\gamma_3\gamma_c}{\alpha\gamma_3 + \gamma_c}, \quad (1)$$

где α соответственно α_n , α_m или α_c , а γ_3 и γ_c – плотность зерна и соломы в свободном состоянии⁶.

Результаты исследования

В таблице 1 представлена количественная оценка процесса сепарации зерна и соломы через подбарабанье молотильного аппарата и остальной части, поступающей на соломотряс, согласно рисунку 2, в зависимости от подачи массы q .



Р и с. 2. Технологическая схема распределения зерновой и соломистой фракции:
 ΣM – Общая подача зерна и соломы, кг/с; M₃ и M_c – соответственно масса зерна и соломы;
 Y₃ и Y_c – количество зерна и соломы, прошедших через подбарабанье;
 Y'₃ и Y'_c – количество зерна и соломы, попавших на соломотряс;
 M_{мз} и M_{пс} – количество зерна и соломы, находящихся в молотильном зазоре

F i g. 2. Technological scheme of distribution of grain and straw fraction:
 ΣM – total feed of grain and straw, kg/s; M₃ and M_c – mass of grain and straw respectively;
 Y₃ and Y_c – number of grain and straw that passed through the drum;
 Y'₃ and Y'_c – number of grain and straw that reached the straw walker;
 M_{мз} and M_{пс} – number of grain and straw in the threshing gap

⁶ Жалнин Э. В., Савченко А. Н. Технологии уборки зерновых комбайновыми агрегатами. М. : Россельхозиздат, 1985. 207 с.

Таблица 1
Table 1

Количественная оценка процесса сепарации зернооломистой массы в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна типа СК-5МЭ «Нива-Эффект» при исходном отношении массы соломы к массе зерна $\alpha_0 = 1:1$ на обмолоте озимой пшеницы
Quantitative evaluation of the separation process of grain-and-straw mass in the threshing mechanism of the SK-5ME Niva-Effect combine harvester at the initial ratio of straw mass to grain mass $\alpha_0 = 1:1$ in threshing of winter wheat

Всего $\sum M /$ Total $\sum M$	Количество обмолачиваемой массы (на входе в барабан), кг/с / Quantity of being threshed mass (at the inlet to the drum), kg/s		Количество материала, прошедшего через подбарабанье, кг/с / Amount of material passed through the threshing section, kg/s				Количество массы, вышедшей из молотильного зазора и попавшей на соломосепаратор, кг/с / The amount of mass coming out of the threshing gap and falling on the straw separator, kg/s						
	В том числе / Including	зерно $M_3 /$ grain M_3	солома $M_c /$ straw M_c	зерно $Y_3 /$ grain Y_3	солома $Y_c /$ straw Y_c	Плотность смеси $\gamma_{\text{см}} /$ кг/м ³ / Mixture density $\gamma_{\text{см}}$ kg/m ³	Отношение массы соломы к массе зерна $\alpha_{\text{н}} /$ Straw to grain weight ratio $\alpha_{\text{н}}$	зерно $Y_3 /$ grain Y_3	солома $Y_c /$ straw Y_c	Отношение массы соломы к массе зерна $\alpha_c /$ Straw to grain weight ratio α_c	Плотность смеси $\gamma_{\text{см}} /$ кг/м ³ / Mixture density $\gamma_{\text{см}}$ kg/m ³		
1,0	0,5	0,5	0,47	95,0	0,22	44,0	0,46	0,025	5,0	0,28	56,0	11,2	21,7
2,0	1,0	1,0	0,82	82,0	0,27	27,0	0,33	0,180	18,0	0,73	73,0	4,1	24,7
3,0	1,5	1,5	1,17	78,0	0,33	22,0	0,28	0,330	22,0	1,17	78,0	3,5	25,5
4,0	2,0	2,0	1,52	76,0	0,41	20,5	0,27	0,480	24,0	1,60	79,6	3,3	25,9
5,0	2,5	2,5	1,86	74,4	0,50	20,0	0,27	0,640	26,0	2,00	80,0	3,7	26,3
6,0	3,0	3,0	2,21	73,6	0,60	20,0	0,28	0,700	26,0	2,40	80,0	3,0	26,3

Статистическая обработка опытных данных выявила следующие уравнения (2), (3) при максимальном уровне доверительной вероятности 0,90–0,95:

для зерна

$$Y_3 = 0,12 + 0,7q, \text{ кг/с}, \quad (2)$$

для соломы

$$Y_c = 0,18 \cdot e^{0,41q}, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где Y_3 и Y_c – соответственно зерно и солома, прошедшие через решетку подбарабанья.

При исходной подаче 0,5 кг/с каждой фракции от исходного их количества через подбарабанье проходит 95 % зерна и 44 % соломы. При общей подаче 6,0 кг/с и каждой фракции 3 кг/с через подбарабанье проходит 73,6 % зерна и 20 % соломы. Полученное линейное уравнение (2) для аппроксимации процесса сепарации зерна через решетку подбарабанья отличается от часто применяемого экспоненциального уравнения М. Н. Летошнева, И. Ф. Василенко, Э. И. Липковича и других⁷. Это, по-видимому, объясняется тем, что в наших экспериментах было учтено все зерно, то есть свободное и невымоленное вместе.

Отношение массы соломы к массе зерна уменьшается от 0,46 до 0,28, а плотность увеличивается от 60,15 до 86 кг/м³ при изменении подачи массы от 1,0 до 6,0 кг/с.

Плотность зерносомистого вороха на начальной части соломотряса увеличивается с 20,7 до 26,3 кг/м³ при уменьшении отношения α с 11,2 до 2,0 при изменении исходной подачи от 1 до 6 кг/с.

Таким образом, плотность вороха, прошедшего через подбарабанье, больше плотности вороха, поступающего

на соломотряс, в 2,8–3,2 раза. Эти данные получены впервые.

Полученные значения плотности каждой фракции обмолачиваемого вороха позволили рассчитать толщину (высоту) слоя зерносомистой смеси, находящейся на стрясной доске перед решетками на очистке примерно на первой ее трети и в начале соломотряса. Расчеты проведены по формуле (4):

$$h_3 = \frac{Y_3 + Y_c}{V_d \cdot B_d \cdot \gamma_n}, \quad (4)$$

где V_d – скорость движения вороха по стрясной доске (0,3 м/с); B_d – ширина стрясной доски.

Соответственно, для вороха, попавшего на начало соломотряса,

$$h_c = \frac{Y'_3 + Y'_c}{V'_c \cdot B'_c \cdot \gamma'_c}, \quad (5)$$

где V'_c – скорость движения вороха по клавишам соломотряса (0,5 м/с).

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таким образом, толщина слоя зерносомистого вороха на стрясной доске под подбарабаньем с увеличением подачи с 1,0 до 6,0 кг/с увеличивается с 2,5 до 10,1 см, а на начале соломотряса – с 2,2 до 19,3 см.

Полученные данные по сепарации зерна и соломы и их плотности дают общее представление о распределении зерновой и соломистых фракций в молотилке зерноуборочного комбайна и могут быть использованы в различных технологических расчетах с уточнением конструктивных параметров рабочих органов, задействованных в процессе обмолота зерносомистой массы.

⁷ Липкович Э. И. Аналитические основы системы машины ; Василенко И. Ф. Теория соломотряса : Сборник трудов по земледельческой механике. Л.–М. : Сельхозиздат, 1961. т. VI ; Летошнев М. Н. Сельскохозяйственные машины : Теория, расчет, проектирование и испытание. 3-е изд., перераб. и доп. М.–Л. : Сельхозгиз, 1955. 764 с.

Расчетная толщина слоя вороха на стрясной доске и в начале соломотряса
Estimated thickness of the layer on the shaking board and at the beginning of the straw walker

Начальная подача при $\alpha = 1:1$, кг/с / Initial feed at $\alpha = 1:1$, kg/s	Толщина слоя вороха, мм / Heap layer thickness, mm	
	на стрясной доске перед решетками очистки / on the shaking board in front of the cleaning grids	на начале соломотряса / at the beginning of the straw walker
1,0	25	22
2,0	36	58
3,0	44	94
4,0	515	126
5,0	68	16
6,0	101	193

Большой интерес представляет динамика параметров зерносоломистой смеси, находящейся непосредственно в молотильном зазоре, то есть в пространстве между планками подбарабана и бичами молотильного барабана. Объем этого пространства V_{Δ} рассчитан по классическому уравнению расчёта объемов объекта исследования:

$$V_{\Delta} = B_{\text{п}} \cdot l_{\text{с}} \cdot h, \text{ м}^3, \quad (6)$$

где $B_{\text{п}}$ – ширина подбарабана, м; $l_{\text{с}}$ – длина секции подбарабана после развертки ($l_{\text{с}} = 0,17$ м); h – величина молотильного зазора под секцией подбарабана (I – 20 мм; II – 16 мм; III – 12 мм; IV – 8 мм; V – 5 мм).

Обобщенные данные представлены в таблице 3, из которой следует, что плотность смеси, находящейся в молотильном зазоре в сжатом состоянии значительно отличается от плотности фракций, прошедших через подбарабанье, и тех, которые попали на начало соломотряса. Плотность зерносоломистого вороха в свободном состоянии, прошедшего через подбарабанье, при изменении подачи в 6 раз от 1,0 до 6,0 кг/с изменилась в 1,42 раза

(с 60,15 до 86 кг·с⁻¹/м³), а попашвего на соломотряс – в 1,2 раза (с 21,7 до 26,3 кг·с⁻¹/м³). В то же время плотность смеси, находящейся в молотильном зазоре, увеличивается в 10,4 и 1,34 раза соответственно, достигая на подаче 6 кг/с 236,7–318,0 кг·с⁻¹/м³ над первой секцией подбарабана до последней.

Такие высокие значения плотности смеси в молотильном зазоре объясняют большие нагрузки на молотильный аппарат, повышенный износ бичей барабана и планок подбарабана на подачах массы от 3 кг/с и выше, что оправдывает идею переменного зазора пропорционально задаче [22].

Обсуждение и заключение

Проведенные исследования показали, что процесс сепарации зерна через решетку подбарабана в зависимости от подачи обмолачиваемой хлебной массы соломы к массе зерна аппроксимируется линейным уравнением, а сепарация соломистых частиц – по экспоненциальной в зависимости от исходной их подачи при доверительной вероятности 0,90–0,95.

В цифровом выражении количество зерна, прошедшего через подбарабанье, уменьшается с 95,0 до 73,6 %,

Расчетная секундная плотность зерносоломистой смеси, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, в молотильном зазоре по секциям подбарабанья в зависимости от исходной подачи

Calculated second density of grain-and-straw mixture, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}/\text{m}^3$, in threshing gap by threshing sections of the concave, depending on the initial feeding

Показатели / Indicators	Секции подбарабанья / Concave sections				
	I	II	III	IV	V
Величина молотильного зазора, мм / Threshing clearance, mm	20	16	12	8	5
Объем пространства между бичами барабана и планками подбарабанья, м^3 / The volume of the space between the drum beats and the threshing section slats, m^3	0,00403	0,00321	0,0024	0,0016	0,001
Количество зерносоломистой смеси в молотильном зазоре, $\text{кг}/\text{с}$ / Quantity of grain-and-straw mixture in the threshing gap, kg/s	0,0915	0,0762	0,061	0,0458	0,03
Исходная подача, $\text{кг}/\text{с}$ / Initial feeding rate, kg/s	Плотность зерносоломистой смеси в молотильном зазоре / Grain-and-straw mixture density in the threshing gap				
1,0	22,7	23,8	25,4	28,6	30,5
2,0	65,3	71,3	75,8	85,0	91,0
3,0	148,9	156,0	166,6	188,1	200,0
4,0	154,0	161,3	172,5	194,3	207,0
5,0	196,5	205,6	220,0	247,5	269,0
6,0	236,7	248,3	263,0	300,0	318,0

а солоmistых частиц – с 44 до 20 % от их исходного количества в обмолачиваемом материале при изменении подачи с 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$.

С увеличением подачи обмолачиваемой хлебной массы в шесть раз от 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$ секундная плотность вороха, прошедшего через решетку подбарабанья, увеличивается в 1,43 раза от 60,15 до 86,00 $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, плотность вороха, попавшего на начало соломотряса, – в 1,21 раза от 21,7 до 26,3 $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, а плотность зерносоломистого вороха, находящегося в молотильном зазоре h на последней секции подбарабанья, увеличивается в 10,43 раза от 30,5 до 318,0 $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, что объясняет повышенные нагрузки на детали молотильного аппарата и повышенный износ бичей барабана и планок подбарабанья.

С увеличением подачи обмолачиваемой хлебной массы от 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$ толщина слоя вороха, попавшего на стрясную доску, перед решетками очистки увеличивается от 25 до 101 мм, а толщина слоя вороха, попавшего на начало соломотряса, – от 22 до 193 мм, что следует учитывать при обосновании компоновочных параметров молотильно-соломотрясной группы рабочих органов.

Научная новизна проведенного исследования состоит в том, что впервые получены аналитические выражения для изменения параметров, которые раньше не изучались: количество прошедшей зерновой и незерновой части обмолачиваемого материала в широком диапазоне подачи от 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$ в реальных эксплуатационных

условиях; плотность материала по длине подбарабанья толщины вороха на стрясной доске и соломотряса в начальной стадии.

Теоретическое значение результатов исследования состоит в том, что доказан разный характер выделения зерна и незерновой части урожая через подбарабанье. Этот процесс аппроксимируется линейным уравнением (2), а для соломы – экспоненциальным уравнением (3). Ранее не проводились исследования по изменению плотности и толщины слоя зерносоломистой смеси, поступающей на очистку и отдельно на соломотряс. Нами установлено, что в диапазоне подачи от 1,0 до 6,0 кг/с (табл. 1, 2) плотность вороха смеси в молотильном зазоре по длине подбарабанья изменяется от начального зазора до конечного.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Получено более комплексное представление о процессе обмолота и сепарации зерна и незерновой части урожая. Исследования по изменению сепарации соломы ранее не проводились в таком диапазоне подачи.

2. Выявлены критические точки изменения плотности обмолачиваемого материала в молотильном аппарате, что при отсутствии средств автоматизации требует от комбайнера не перегружать молотилку комбайна, потому что плотность материала доходит до 300 кг/м³. Это приводит к большому травмированию зерна и оправдывает идею изменения молотильного зазора по всей длине подбарабанья.

3. Полученные данные могут быть использованы при проектировании новых конструкций молотильных устройств комбайнов с учетом рекомендуемых параметров толщины слоя зерносоломистого вороха и автоматического регулирования молотильного зазора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Review of Grain Threshing Theory and Technology / J. Fu [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11, Issue 3. P. 12–20. doi: <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181103.3432>
2. Results of Experimental Studies of Pneumatic Threshing of Ears with Subsequent Separation of Fractions / V. Pakhomov [et al.] // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Lecture Notes in Networks and Systems ; A. Beskopylny, M. Shamtsyan (eds.). Vol. 246. Cham : Springer, 2022. P. 147–153. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_16
3. Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop / A. Kumar [et al.] // International Journal of Pure & Applied Bioscience. 2017. Vol. 5, Issue 2. P. 604–611. doi: <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2497>
4. Cujbescu D., Gageanu I., Iosif A. Mathematical Modeling of Ear Grain Separation Process Depending on the Length of the Axial Flow Threshing Apparatus // INMATEH Agricultural Engineering. 2021. Vol. 65, Issue 3. P. 101–110. URL: <https://clck.ru/hUuoM> (дата обращения: 01.02.2022).
5. Fisunova E., Groshev L., Baryshnikova O. Analysis of the Threshing Process in the Interriffle Space of the Threshing Device [Электронный ресурс] // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Vol. 224. 2018. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405017>
6. Дослідження впливу пропускної здатності комбайна на якість зерна, відокремленого пристроєм попереднього обмолоту / В. Шейченко [и др.] // Механізація та електрифікація сільського господарства. 2019. Вип. 9. С. 72–80. doi: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-9-8>
7. Гусаров В. В., Клочков А. В., Курзенков С. В. Параметры зон воздействия молотильно-сепарирующего устройства на обмолачиваемую массу // Вестник Белорусской государственной *Agricultural engineering*

сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 175–181. URL: <https://clck.ru/hUvgy> (дата обращения: 01.02.2022).

8. Threshing and Grain Separating Mechanism with Differentiate Concave for Intensification of Threshing and Grain Separation / A. Klochkov [et al.] // Agricultural Engineering. 2017. Vol. 21, Issue 3. P. 29–45.

9. Жалнин Э. В. Типаж комбайнов: какой есть и какой нужен [Электронный ресурс] // Сельский механизатор. 2012. № 8. URL: <http://selmech.msk.ru/812.htm> (дата обращения: 01.02.2022).

10. Пустыгин М. А. Закономерности сепарации зерна в молотильно-сепарирующих устройствах // Труды ВИСХОМ. 1977. Вып. 88.

11. Orobinsky V. I., Gulevsky V. A., Gievsky A. M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>

12. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties / M. Govindaraj [et al.] // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017. Vol. 6, Issue 8. P. 2375–2383. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.281>

13. Франциско О. Ю. Моделирование структуры управления региональным АПК приемами регрессионного анализа // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 83. С. 49–53. doi: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-83-49-53>

14. Matuchchenko A. E., Klasner G. G., Sarksyian L. D. Analysis and Estimation of Energy Costs during Operation of a Combine with a Differential Type Threshing Machine [Электронный ресурс] // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2402, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0071892>

15. Effects of Impurity on the Efficiency of a Legume Threshing Machine / O. B. Aluko [et al.] // African Journal of Agricultural Research. 2020. Vol. 16, Issue 12. P. 1700–1709. doi: <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14895>

16. Modeling the Throughput Capacity of Threshing-Separating Apparatus of Grain Harvester's Combines / I. Rogovskii [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/4/042098>

17. Yu Ya., Fu H., Yu J. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process // Advanced Powder Technology. 2015. Vol. 26, Issue 5. P. 1400–1409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.07.015>

18. Алферов С. А., Брагинцев В. С. Обмолот и сепарация зерна в молотильных устройствах как единый вероятностный процесс // Тракторы и сельхозмашины. 1972. № 4. С. 23–26.

19. Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses / M. Sotnar [et al.] // Acta Technologica Agriculturae. 2018. Vol. 21, Issue 3. P. 105–108. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183378801> (дата обращения: 01.02.2022).

20. Семенов В. А., Семенова Е. И. Способ обмолота колосьев и сепарации зерна в молотильно-сепарирующем устройстве // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2013. № 14. С. 123–129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21604314> (дата обращения: 01.02.2022).

21. Shahbazi F., Valizadeh S., Dolwlatshah A. Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2012. Vol. 14, Issue 4. P. 150–155. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2169> (дата обращения: 01.02.2022).

22. Способ регулирования молотильно-сепарирующего устройства : патент 1144651 СССР / Цвик Б. Д. [и др.]. № 3562521/30-15 ; заявл. 02.03.83 ; опубл. 15.03.1985. 2 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/45/b3/9d/0e1e7057985efa/SU1144651A1.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).

Поступила 07.02.2022; одобрена после рецензирования 01.03.2022; принята к публикации 15.03.2022

Об авторах:

Жалнин Эдуард Викторович, 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), доктор технических

наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, 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), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, misha2728@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Э. В. Жалнин – научное руководство, формулирование основной концепции, цели и задач исследования, разработка методов испытаний, доработка текста, формирование выводов.

М. Е. Чаплыгин – подготовка первоначального варианта текста, анализ литературных источников, визуализация, доработка текста, формирование частных и общих выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Fu J., Chen Z., Han L., Ren L. Review of Grain Threshing Theory and Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(3):12–20. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432>

2. Pakhomov V., Braginet S., Bakhchevnikov O., Rudoy D. Results of Experimental Studies of Pneumatic Threshing of Ears with Subsequent Separation of Fractions. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (Eds.). XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 246. Cham: Springer; 2022. p. 147–153. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_16

3. Kumar A., Kumar A., Khan K., Kumar D. Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*. 2017;5(2):604–611. doi: <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2497>

4. Cujbescu D., Gageanu I., Iosif A. Mathematical Modeling of Ear Grain Separation Process Depending on the Length of the Axial Flow Threshing Apparatus. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2021;65(3):101–110. Available at: <https://clck.ru/hUuoM> (accessed 01.02.2022).

5. Fisunova E., Groshev L., Baryshnikova O. Analysis of the Threshing Process in the Interriffle Space of the Threshing Device. In: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Vol. 224. 2018. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405017>

6. Sheychenko V., Kuzmich A., Dudnikov I., Shevchuk M., et al. Investigation Effect of the Throughput Combine on the Quality of Grain Separated by a Preliminary Threshing Device. *Mechanization and Electrification of Agricultural*. 2019;9:72–80. (In Ukr., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-9-8>

7. Gusarov V.V., Klochkov A.V., Kurzenkov S.V. Parameters of Zones of Influence of Threshing-Separating Device on Threshed Mass. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2015;(3):175–181. Available at: <https://clck.ru/hUvgv> (accessed 01.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

8. Klochkov A., Gusarov V., Kubon M., Kamiński Ja. Threshing and Grain Separating Mechanism with Differentiate Concave for Intensification of Threshing and Grain Separation. *Agricultural Engineering*. 2017;21(3):29–45.

9. Zhalnin E.V. Harvester Type: What Is and What Is Needed. *Rural Mechanic*. 2012;(8). Available at: <http://selmech.msk.ru/812.htm> (accessed 01.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

10. Pustygin M.A. [Laws of Grain Separation in Threshing and Separating Devices]. *Trudy VISKhOM*. 1977;88. (In Russ.)

11. Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>

12. Govindaraj M., Masilamani P., Asokan D., et al. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017;6(8):2375–2383. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.281>
13. Frantsisko O.Yu. Modeling of the Regional Agriculture Management Structure by Regression Analysis Methods. *Works of the Kuban State Agrarian University*. 2020;(83):49–53. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-83-49-53>
14. Matuchchenko A.E., Klasner G.G., Sarksyan L.D. Analysis and Estimation of Energy Costs during Operation of a Combine with a Differential Type Threshing Machine. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2402(1). doi: <https://doi.org/10.1063/5.0071892>
15. Aluko O.B., Sanni L.A., Akingbade T.O., Ogundahunsi O. Effects of Impurity on the Efficiency of a Legume Threshing Machine. *African Journal of Agricultural Research*. 2020;16(12):1700–1709. doi: <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14895>
16. Rogovskii I., Martiniuk D.I., Voinash S.A., Luchinovich A.A. Modeling the Throughput Capacity of Threshing-Separating Apparatus of Grain Harvester's Combines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;677. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/4/042098>
17. Yu Ya., Fu H., Yu J. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process. *Advanced Powder Technology*. 2015;26(5):1400–1409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.07.015>
18. Alferov S.A., Braginets V.S. [Grain Threshing and Separation in Threshing Devices as a Single Probabilistic Process]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1972;(4):23–26. (In Russ.)
19. Sotnar M., Pospisil J., Marecek J., et al. Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018;21(3):105–108. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183378801> (accessed 01.02.2022).
20. Semenov V.A., Semenova Ye.I. The Method of Thrashing of Ears and Grain Separation in a Threshing and Separating Drum. *Russian State Agrarian Correspondence University Bulletin*. 2013;(14):123–129. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21604314> (accessed 01.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Shahbazi F., Valizadeh S., Dolwlatshah A. Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2012;14(4):150–155. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2169> (accessed 01.02.2022).
22. Tsvik B.D., Zhalnin E.V., Rogachkov I.G., Sevastyanov A.O. [Method for Adjusting the Threshing and Separating Device]. Patent 1,144,651 USSR. 1985 March 15. 2 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/45/b3/9d/0e1e7057985efa/SU1144651A1.pdf> (accessed 01.02.2022). (In Russ.)

Submitted 07.02.2022; approved after reviewing 01.03.2022; accepted for publication 15.03.2022

About the authors:

Eduard V. Zhalnin, 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), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Mikhail E. Chaplygin, 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), Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, misha2728@yandex.ru

Contribution of the authors:

E. V. Zhalnin – scientific guidance, formulation of the main concept, goal and objectives of the study, development of test methods, finalization of the text, formation of conclusions.

M. E. Chaplygin – preparation of the initial version of the text, analysis of literary sources, visualization, finalization of the text, formation of private and general conclusions.


All authors have read and approved the final manuscript.



Теоретическое исследование подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы

П. И. Гаджиев , Е. В. Шестакова, Г. Г. Рамазанова

Российский государственный аграрный заочный университет
(г. Балашиха, Российская Федерация)

 pgadjiev@yandex.ru

Аннотация

Введение. Качество работы картофелеуборочных машин, наряду с конструктивной особенностью, зависит от способа уборки картофеля. Возделывание картофеля предусматривает выполнение комплекса мероприятий, направленных на повышение и сохранение качества товарной продукции при уборке картофеля. В связи с этим для снижения потерь урожая и предотвращения ветровой эрозии почвы предлагается агрегат и способ уборки картофеля. Чтобы уменьшить количество комков, соизмеримых с размерами клубней, перед подкапывающим рабочим органом картофелеуборочного агрегата устанавливаются рыхлительные лапы. Цель работы – провести теоретическое исследование подкапывающего рабочего органа картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы.

Материалы и методы. Проанализирована работа подкапывающего лемеха. Его угол наклона к горизонту обуславливает наименьшее сгруживание лемеха, минимальное сопротивление движению почвенного пласта и рациональную высоту подъема массы. Рациональное значение угла наклона лемеха определено с учетом условия, что сила подпора пласта должна быть минимальной.

Результаты исследования. Предложена математическая зависимость определения рационального значения угла наклона лемеха, обуславливающего минимальное значение силы подпора пласта, действующей вдоль лемеха. В результате исследований построены графические зависимости рационального значения угла наклона лемеха от коэффициента трения почвы о лемех и высоты подъема пласта почвы лемехом от оптимального значения угла наклона при фиксированной длине лемеха.

Обсуждение и заключение. При проведении теоретических исследований подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата учитывались тип почвы и коэффициент трения почвенного пласта о лемех. Определен рациональный угол наклона лемеха, при котором будет обеспечен оптимальный развал пласта с минимальным сгруживанием. Это обеспечит снижение потерь урожая.

Ключевые слова: сепарация почвы, картофелеуборочный агрегат, элеватор, угол наклона лемеха, сила подпора пласта, эрозия почвы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гаджиев П. И., Шестакова Е. В., Рамазанова Г. Г. Теоретическое исследование подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 263–278. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.263-278>

© Гаджиев П. И., Шестакова Е. В., Рамазанова Г. Г., 2022




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

Theoretical Research of the Potato Harvester Lifting Plowshare to Reduce Yield Losses and Soil Erosion

P. I. Gadzhiev , E. V. Shestakova, G. G. Ramazanova

Russian State Agrarian Correspondence University
(Balashikha, Russian Federation)

 pgadjiev@yandex.ru

Abstract

Introduction. The potato harvester operation quality depends not only on the design features, but also on the method for harvesting of potatoes. Cultivation of potatoes involves the implementation of a set of measures aimed at improving and preserving the quality of commercial products when harvesting of potatoes. In this regard, to reduce yield losses and prevent wind erosion of soil, a unit and method for harvesting of potatoes is proposed. To reduce the number of clods commensurate with the size of tubers, there are installed ripper tines ahead of the potato harvester tool. The aim of the work is to conduct a theoretical research of the tool of the potato harvester to reduce yield losses and soil erosion.

Materials and Methods. The lifting plowshare operation has been analyzed. Its angle to the horizon determines the least displacement of the lifting plowshare, the minimum resistance to the soil layer movement and optimal height of lifting soil mass. The optimal value of the plowshare inclination angle has been determined taking into account the condition that the back pressure of the soil layer should be minimal.

Results. There has been proposed a mathematical dependence for determining the optimal value of the angle of plowshare inclination, which determines the minimum value of the soil layer back pressure acting along the plowshare. As a result of the research, there have been plotted graphical dependences of the optimal value of the plowshare inclination angle on the coefficient of soil friction on the plowshare and dependences of the height of a soil layer lifting with the plowshare on the inclination angle optimal value at a fixed plowshare length.

Discussion and Conclusion. In carrying out the theoretical research of the potato harvester plowshare, the soil type and coefficient of a soil layer friction on the plowshare were taken into account. There has been determined the optimal angle of plowshare inclination to provide optimal breaking down of soil with minimum soil bulldozing, thus ensuring reduction in yield losses.

Keywords: soil separation, potato harvester, elevator, plowshare angle, layer back pressure, soil erosion

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

For citation: Gadzhiev P.I., Shestakova E.V., Ramazanova G.G. Theoretical Research of the Potato Harvester Lifting Plowshare to Reduce Yield Losses and Soil Erosion. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):263–278. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.263-278>

Введение

Качество убранный картофеля зависит не только от работы картофелеуборочных машин и их конструктивных особенностей, почвенно-климатических условий, но и от самих технологий возделывания картофеля [1–3]. Недостатком подкапывающего рабочего

органа картофелеуборочных машин является то, что почва при подкопе вместе с клубненой массой разваливается по сторонам. В результате этого происходит повреждение клубней рабочими органами комбайна [4–6]. Для устранения этой проблемы разработан агрегат и предложен способ уборки картофеля,

при котором перед подкапывающим органом устанавливаются дополнительные рыхлительные лапы [7]. Потеря при уборке картофеля в основном происходит ввиду повреждения клубней при протаскивании их с почвенными комками на сепарирующем элеваторе. Чтобы уменьшить количество комков, соизмеримых с размерами клубней, предлагается установить рыхлительные лапы в междурядьях агрегата [8; 9].

По данным Приморского ГСХА, «рыхление междурядий перед уборкой на глубину 14–16 см снижает содержание примесей в ворохе на 10 %, а повреждение клубней 1,5 раза»¹. Ветровая эрозия почвы отрицательно влияет на педосферу. В результате применения тяжелой сельскохозяйственной техники и многоходовых проходов при уборке картофеля плодородный слой почвы расплывается и сдувается ветром [10–13]. При этом «увеличивается деградация почв и уменьшается площадь почвенного покрова из-за превращения плодородных почв в пустыни» [14]. Эрозия почвы уничтожает верхние гумусовые горизонты, в которых сосредоточено почвенное плодородие. С развитием индустрии тяжелой сельскохозяйственной техники предотвращение ветровой эрозии является актуальным вопросом [15–17].

Цель исследования – провести теоретическое исследование подкапывающего рабочего органа картофелеуборочного агрегата, чтобы рекомендовать конструктивные и технологические параметры, которые позволят снизить потери урожая в виде повреждения клубней и заблаговременно предотвратить ветровую эрозию почвы во время уборки картофеля.

Обзор литературы

Н. М. Кандаулов условно разделил профиль картофельной грядки по связности на 6 зон и для каждой определил разрушающее усилие для почвенных образцов:

1. Корковая зона с толщиной 10–15 мм, требуемое разрушающее усилие 7,86–10,78 Н.

2. Зона, которая расположена ниже по всему периметру корковой, называется рыхлым слоем. Она разрушается при слабом прикосновении.

3. Зона ниже рыхлой зоны названа переходной. Требуемое разрушающее усилие относительно невелико: 2,9–4,9 Н. В зону входит пахотный слой, не подверженный деформации от тракторных колес.

4. Плотная зона расположена по бокам грядки. Для нее разрушающее усилие равно 3,88–3,72 Н.

5. Для зоны междурядий необходимое усилие 7,86–9,80 Н.

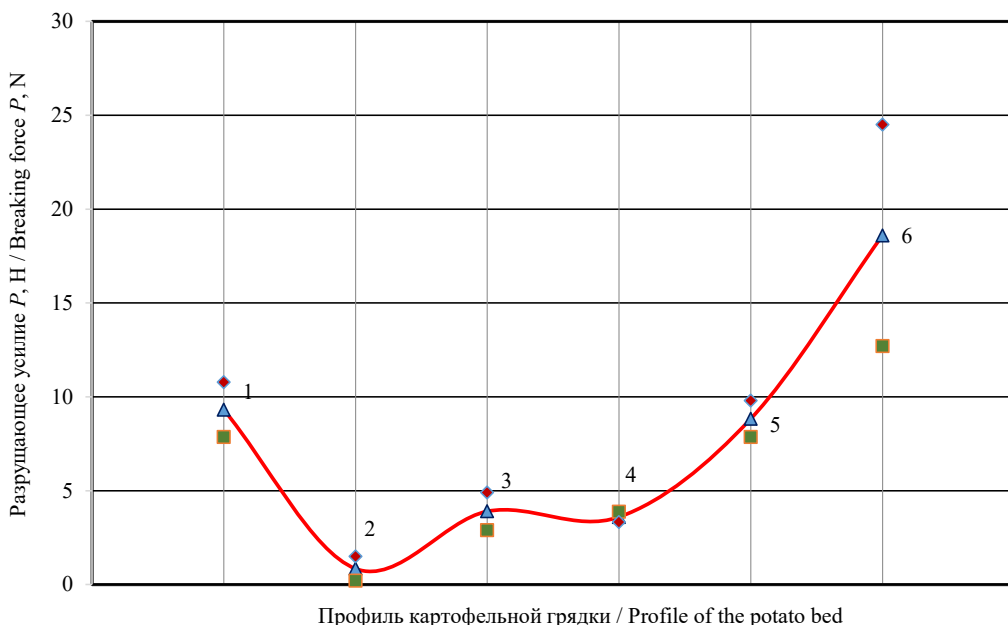
6. Зона наибольшей плотности находится на нижнем слое грядки. Для данной зоны разрушающее усилие высокое и колеблется в пределах 12,7–24,5 Н².

Как видно из анализа исследований, самые большие разрушающие усилия для улучшения разрыхления почвы потребуются в четвертой и шестой зоне картофельной грядки, где больше всего прикасаются колеса трактора (рис. 1).

Для осуществления данной технологии при уборке картофеля предложен картофелеуборочный агрегат, общий вид которого показан на рисунке 2а; на рисунке 2б – технологическая схема картофелеуборочного агрегата; на рисунке 2с – фрагменты расположения рыхлительных лап в междурядьях и подкапывающего лемеха

¹ Бочкарев В. В., Кияшко Н. В., Обухов В. П. Уборка и хранение картофеля, корнеплодов и овощей : учебн. пособие. Усурийск, 2015. 132 с.

² Кандаулов Н. М. Исследование связности картофельной грядки и ее влияния на выбор технологических и конструктивных параметров картофелеуборочных машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1964. 20 с.



Р и с. 1. Требуемое разрушающее усилие в зависимости от профиля картофельной грядки: 1 – корковая зона; 2 – рыхлый слой; 3 – переходная зона; 4 – плотная зона; 5 – зона междурядий; 6 – зона наибольшей плотности

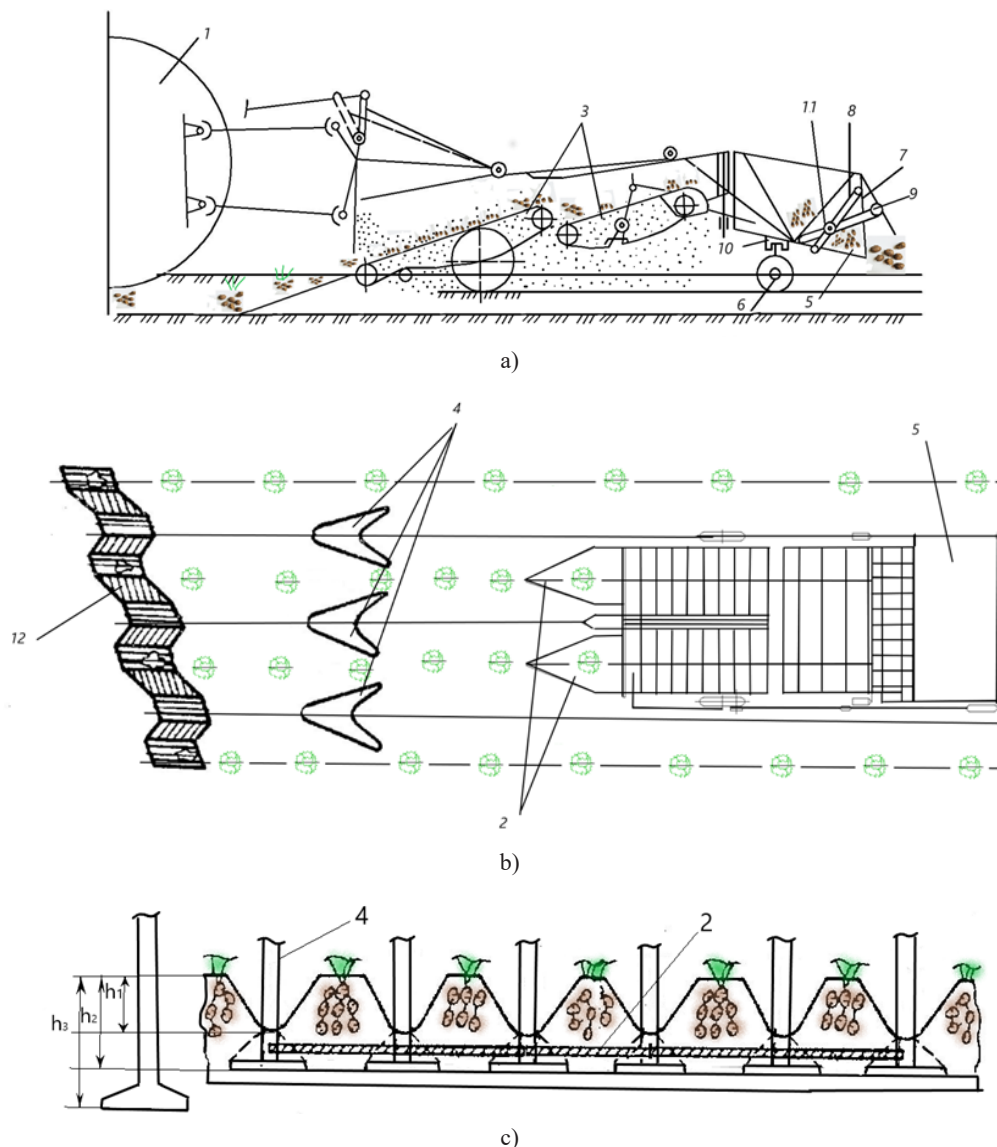
F i g. 1. Required breaking force depending on the profile of the potato bed: 1 – crust zone; 2 – loose layer; 3 – transition zone; 4 – dense zone; 5 – row spacing zone; 6 – highest density zone

соответственно. Установленные рыхлительные лапы непосредственно обрабатывают эти зоны между грядками.

Отличие работы картофелекопателя по предложенному способу заключается в том, что перед выкапыванием клубней идет рыхление междурядий в области залегания клубней. После выкапывания картофеля происходит сепарация вороха, отсеянные клубни от почвы и других примесей накапливаются в емкости, а в последующем порциями выгружаются на убранное поле.

Работа картофелеуборочного агрегата происходит следующим образом. При проходе агрегат выкапывает клубни с разрыхленной грядки и передает на сепарирующие элеваторы. Причем перед выкапыванием клубней грядка рыхлится рыхлительными лапами, установленными перед выкапывающими лемехами. Для создания

противоэрозионной преграды одна лапа рыхлителя установлена на большую глубину, чем остальные. Выкопанный клубненосный пласт проходит через сепарирующие элеваторы, отсеянная почва возвращается на поверхность поля, а клубни картофеля поступают в дозатор-накопитель, установленный за вторым элеватором [7]. «При достаточном наполнении накопителя оператор из кабины трактора через систему рычагов воздействует шарнирным толкателем 11 на выгрузную стенку 7, при этом установлен толкатель так, что своим плечом воздействует на фиксатор 9, который выходит из замка защелки 10, выгрузная стенка открывается, и накопленный картофель в большом количестве разгружается на почву в определенных местах и впоследствии подбирается и отправляется на стационар для дальнейшей обработки и переработки» [7].



Р и с. 2. а) Общий вид картофелеуборочного агрегата; б) технологическая схема картофелеуборочного агрегата; в) фрагменты расположения рыхлительных лап в междурядьях и подкапывающего лемеха соответственно; 1 – энергосредство; 2 – подкапывающий лемех;

3 – сепарирующие элеваторы; 4 – рыхлительные лапы; 5 – дозатор-накопитель;

6 – самоустанавливающееся колесо; 7 – выгрузная стенка; 8 – шарнирное закрепление стенки;

9 – фиксатор выгрузной стенки; 10 – защелка; 11 – шарнирный толкатель;

12 – выкапывание клубней

Fig. 2. a) General view of the potato harvester; b) process scheme of the potato harvester; c) fragments of the location of ripper tines in between the rows and the lifting plowshare respectively;

1 – power tool; 2 – lifting plowshare; 3 – separating elevators; 4 – ripper tines; 5 – metering pump;

6 – self-aligning wheel; 7 – ejector wall; 8 – hinged wall fastening; 9 – ejector wall fastening; 10 – latch;

11 – hinged pusher; 12 – tubers digging out

Как было указано, задачей картофелеуборочного агрегата также являются противоэрозионные мероприятия для предотвращения ветровой эрозии почвы. Известно, что в природе под воздействием атмосферных осадков и ветра, а также механического влияния происходит полное или частичное уничтожение почвенного и растительного покровов в виде эрозии почвы [11; 12; 18]. Ее объем в большей степени зависит от способа обработки почвы и в меньшей от свойств самой почвы. Для защиты пахотных земель от ветровой эрозии применяют комплекс противоэрозионных мероприятий, включающий в себя систему безотвальной обработки почвы, сокращение числа проходов сельскохозяйственных и транспортных машин по полям. Наиболее распространенными рабочими органами противоэрозионных почвообрабатывающих орудий являются плоскорезящие глубокорыхлительные лапы. Подрезанный пласт почвы разрыхляется и падает без оборота, при этом стерня остается на поверхности поля, мелкие фракции поверхностного слоя почвы просыпаются во внутренние слои пласта, способствуя эрозионным процессам [19; 20]. «Такое выполнение картофелеуборочного агрегата и способ уборки картофеля позволяют уменьшить использование транспортной техники, которая воздействует на эрозию почвы, повысить производительность, уменьшить использование ручного труда и уменьшить эрозию почвы» [7].

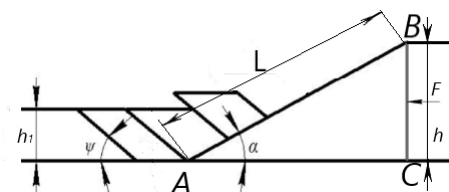
Материалы и методы

Одним из основных параметров подкапывающего лемеха картофелеуборочных машин является угол его наклона к горизонту α . Угол обуславливает наименьшее сгуживание лемеха, минимальное сопротивление движению почвенного пласта и высоту h подъема массы.

Для определения рационального значения угла α сделаем следующие допущения:

- длина лемеха постоянна $L = \text{const}$;
- сгуживание и развал подкапываемого пласта на лемехе отсутствуют.

Применяя теорию клина академика В. П. Горячкина, исследуем основные параметры подкопа пласта (рис. 3).



Р и с. 3. Схема взаимодействия клина с почвой:

F – тяговое усилие трактора, Н; α – угол наклона лемеха, град; ψ – угол скола пласта, град; h_1 – толщина клубненосного пласта, м

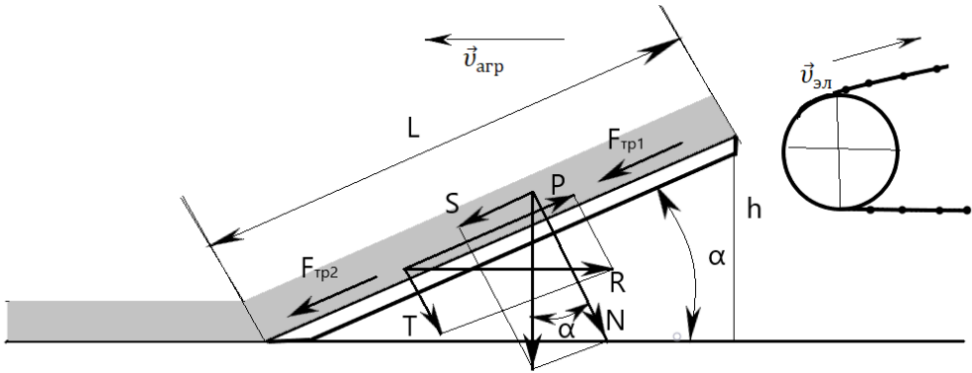
F i g. 3. Scheme of wedge-soil interaction:
 F – tractor pulling force, Н; α – angle of plowshare inclination, deg.; ψ – slope angle, deg.;
 h_1 – tuber layer thickness, m

Если принять длину лемеха постоянной, то высота h подъема пласта лемехом будет линейно зависеть от угла наклона лемеха α . Из треугольника АСВ (рис. 3)

$$h = L \sin \alpha. \quad (1)$$

При равномерном движении лемеха на пласт почвы, находящийся на нем, действуют следующие силы: G – сила тяжести пласта почвы, которая раскладывается на две составляющие N (нормальную к поверхности лемеха) и S (действующую вдоль лемеха вниз), Н; R – сила подпора со стороны пласта, которая раскладывается на T (нормальную, действующую перпендикулярно поверхности лемеха) и P (силу подпора пласта, действующую вдоль лемеха вверх), Н (рис. 4).

Нормальные составляющие силы N и T вызывают трение между почвенным



Р и с. 4. Схема сил, действующих на почвенный пласт
F i g. 4. Scheme of forces acting on a soil layer

пластом и лемехом, которое определяется формулами $F_{\text{тр}1} = fN$ и $F_{\text{тр}2} = fT$, где f – коэффициент трения между почвенным пластом и лемехом.

Рациональное значение угла наклона лемеха α определим с учетом условия, что сила подпора пласта P , действующая вдоль лемеха, должна быть минимальна. Это условие обеспечит минимальный развал пласта на лемехе.

Условия равновесия сил, действующих на почвенный пласт

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{F}_{\text{тр}1} + \vec{F}_{\text{тр}2} + \vec{S} + \vec{N} = 0. \quad (2)$$

Проектируя силы на плоскость лемеха, получим уравнение

$$P - fN - fT - S = 0, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения между почвенным пластом и лемехом; $N = G \cos \alpha$; $S = G \sin \alpha$; $T = Ptg \alpha$. Подставим эти равенства вместо N , S , T в (3) и получим

$$P - fG \cos \alpha - fPtg \alpha - G \sin \alpha = 0. \quad (4)$$

Из равенства (4) выразим силу подпора почвенного пласта P :

$$P = \frac{G(f \cos \alpha + \sin \alpha)}{1 - ftg \alpha}. \quad (5)$$

Силу тяжести (вес) почвенного пласта можно определить формулой:

$$G = h_1 b L \gamma = h_1 b \frac{h}{\sin \alpha} \gamma, \quad (6)$$

где h_1 – толщина клубненосного пласта, м; b – ширина почвенного пласта, м; γ – объемный вес почвенного пласта, кг/м³.

Подставив в равенство (5) вместо веса почвенного пласта G выражение из формулы (6), получим зависимость силы подпора P почвенного пласта от угла α наклона лемеха.

$$P = \frac{h_1 b \frac{h}{\sin \alpha} \gamma (f \cos \alpha + \sin \alpha)}{1 - ftg \alpha}.$$

После преобразования имеем

$$P = h_1 b h \gamma \frac{(f \text{ctg} \alpha + 1)}{1 - ftg \alpha}. \quad (7)$$

Для определения оптимального значения угла α наклона лемеха, соответствующего минимальному значению силы подпора P почвенного пласта, продифференцируем выражение (7):

$$\frac{dP}{d\alpha} = \frac{d \left[h_1 b h \gamma \frac{(f \operatorname{ctg} \alpha + 1)}{1 - f \operatorname{tg} \alpha} \right]}{d\alpha} =$$

$$= h_1 b h \gamma \frac{\frac{f}{\cos^2 \alpha} + \frac{2f^2}{\cos \alpha \sin \alpha} - \frac{f}{\sin^2 \alpha}}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha)^2}.$$

Приравняем производную к нулю и решим полученное квадратное уравнение (8) относительно $\operatorname{tg} \alpha$:

$$h_1 b h \gamma \frac{\frac{f}{\cos^2 \alpha} + \frac{2f^2}{\cos \alpha \sin \alpha} - \frac{f}{\sin^2 \alpha}}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha)^2} = 0,$$

$$\frac{f}{\cos^2 \alpha} + \frac{2f^2}{\cos \alpha \sin \alpha} - \frac{f}{\sin^2 \alpha} = 0,$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha + 2f^2 \operatorname{tg} \alpha - 1 = 0. \quad (8)$$

Получим, что оптимальное значение угла наклона лемеха зависит от коэффициента трения почвенного пласта о лемех:

$$\operatorname{tg} \alpha = -f + \sqrt{f^2 + 1}. \quad (9)$$

Результаты исследования

Эффективность работы картофелеуборочных комбайнов в целом зависит от физико-механических свойств почвы. Учеными доказано, что при работе картофелеуборочных машин, на ряду с механическим составом, влажность почвы играет главную роль, поскольку влияет на коэффициент трения почвы

о подкапывающий лемех. Коэффициент трения почвы, в свою очередь, влияет на скорость перемешивания клубненосной массы по лемеху. С увеличением влажности до определенного предела коэффициент трения повышается, затем по мере дальнейшего увлажнения почвы снижается³. Почвы имеют разный коэффициент трения: для супесчаных 0,30–0,35; для суглинистых 0,35–0,50; для глины 0,5–0,6.

В результате проведенного теоретического исследования получено равенство (9), из которого можно определить оптимальное значение угла наклона лемеха:

$$\alpha = \operatorname{arctg}(-f + \sqrt{f^2 + 1}).$$

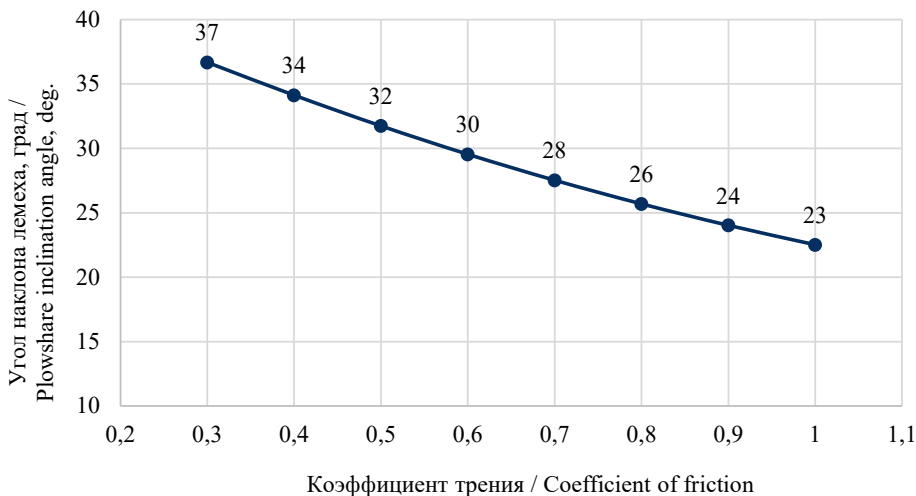
Как видно из полученного равенства, величина угла установки лемеха как одного из основных параметров подкапывающего лемеха зависит от коэффициента трения почвы о лемех обратно пропорционально. Определенное таким образом значение угла обеспечит наименьшее сгруживание лемеха, минимальное сопротивление движению почвенного пласта, снижение повреждаемости клубней.

Зависимость оптимального значения угла наклона лемеха от коэффициента трения почвы о лемех показано на графике (рис. 5). Из графика следует, что с увеличением коэффициента трения почвы о лемех угол наклона лемеха уменьшается.

С учетом оптимального значения угла наклона лемеха по формуле (1) построим график зависимости высоты подъема пласта почвы лемехом от оптимального значения угла наклона при фиксированной длине L лемеха (рис. 6).

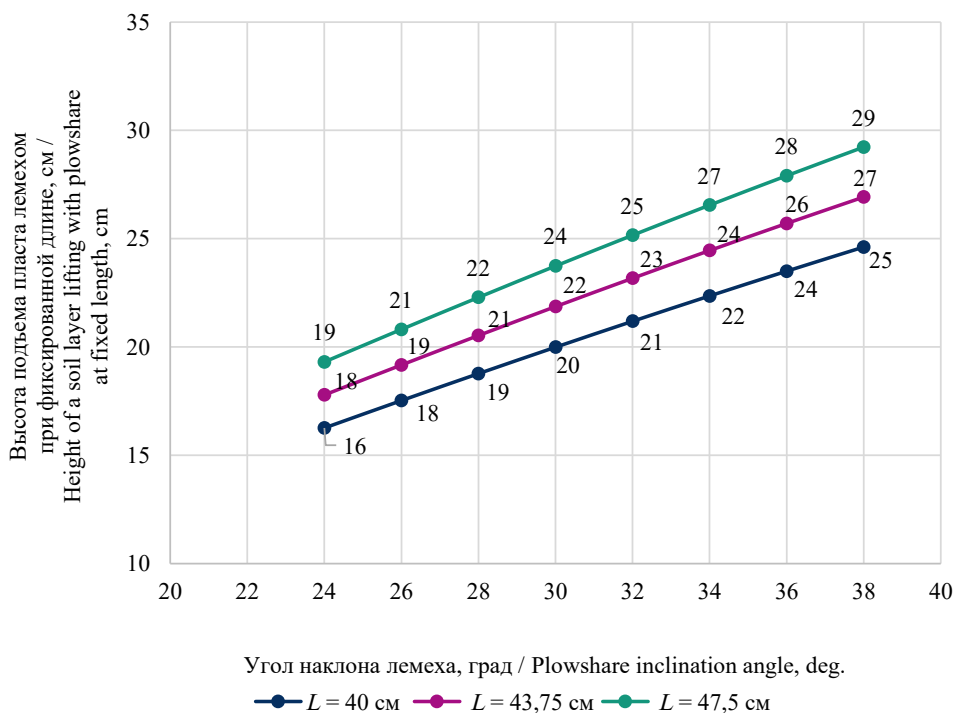
Полученные параметры подкапывающего лемеха (угол наклона, длина лемеха L) в основном обеспечивают

³ Петров Г. Д. Картофелеуборочные машины. М. : Машиностроение, 1984. 320 с.



Р и с. 5. График зависимости оптимального значения угла наклона лемеха от коэффициента трения почвы о лемех

F i g. 5. Graph of the dependence of the optimal value of the plowshare inclination angle on the coefficient of soil friction on the plowshare



Р и с. 6. График зависимости высоты подъема пласта почвы лемехом от оптимального значения угла наклона при фиксированной длине L лемеха

F i g. 6. Graph of the dependence of the height of lifting the soil layer with a plowshare on the optimal value of the inclination angle at a fixed length L of the plowshare

лучшее перемещение клубненосного пласта по лемеху. При повышенной влажности для уменьшения сгуживания лемеха и для улучшения сепарации почвы угол наклона лемеха следует увеличить относительно горизонтали. При меньшей влажности угол наклона лемеха уменьшается во избежание развала по бокам почвенного пласта для снижения потерь урожая.

Для подтверждения теоретических исследований влияния угла установки лемеха, высоты подъема пласта почвы лемехом и почвенно-клубненосной массы на сгуженность лемеха при условии, что длина L постоянна, разработан план проведения полнофакторного эксперимента. Для этого были приняты наиболее значимые факторы, влияющие на результат работы лемеха, обеспечивающие минимальный развал пласта: угол установки лемеха α (x_1), высота подъема пласта h (x_2) и почвенно-клубненосная масса m (x_3). В зависимости от условий проведения каждого опыта меняли верхний и нижний

уровень факторов. В таблице представлены уровни и интервалы варьирования факторов.

При проведении исследования процесса сгуживания лемеха почвенно-клубненосной массой в качестве критерия оптимизации (функции отклика) рассматривалась сила подпора пласта P , действующая вдоль лемеха.

По результатам проведенного полнофакторного эксперимента получено уравнение регрессии для определения эффективности сгуживания лемеха:

$$P = 1\,003,33 + 0,663x_1 + 0,64x_2 + 9,038x_3 - 30,072x_1^2 + 51,912x_2^2 + 16,067x_3^2 - 10,967x_1x_2 + 12,41x_1x_3 - 13,353x_2x_3, \quad (10)$$

По критерию Фишера уравнение регрессии (10) является адекватным и применимо для решения производственных задач. Определим значение факторов, обеспечивающих эффективное сгуживание лемеха без развала пласта.

Т а б л и ц а
T a b l e

Факторы и интервалы их варьирования
Factors and their variation intervals

Факторы / Factors	Нижний уровень (-1) / Lower level (-1)	Основной уровень (0) / Basic level (0)	Верхний уровень (+1) / Upper level (+1)	Интервал варьирования / Variation interval	Наименование фактора / Factor name
x_1 (α)	22	40	58	18	Угол установки лемеха, град / Plowshare inclination angle, deg.
x_2 (h)	0,2	0,3	0,4	0,1	Высота подъема пласта, м / Height of a soil layer lifting, m
x_3 (m)	250	300	350	50	Почвенно-клубненосная масса на лемехе, кг / Soil and tuber mass on the plowshare, kg

Для полученного уравнения регрессии (10) были построены поверхности откликов, показывающие влияние факторов на силу подпора пласта (рис. 7–9).

1. Если в качестве постоянного фактора принять угол установки лемеха $x_1 = 0$ ($\alpha = 40^\circ$), то уравнение регрессии (10), с учетом постоянного фактора, запишется в виде

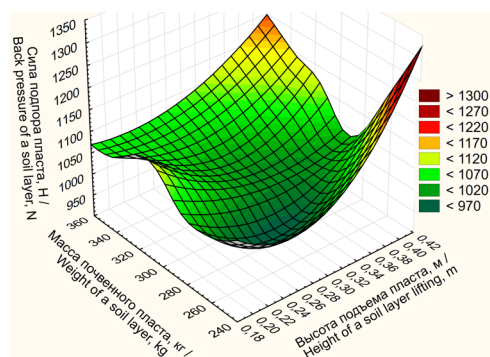
$$P = 1\,003,325 + 0,64x_2 + 9,038x_3 + 51,912x_2^2 + 16,067x_3^2 - 13,353x_2x_3. \quad (11)$$

Из анализа графиков отклика (рис. 7) видно, что экстремум функции

отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Оптимальное значение силы подпора пласта составляет $P_{\text{opt}} = 1\,001,96$ Н и достигается при $x_2 = -0,045$ (высота подъема пласта 0,296 м), $x_3 = -0,3$ (почвенно-клубненосная масса 285 кг) и $x_1 = 0$ (угол установки лемеха $\alpha = 40^\circ$).

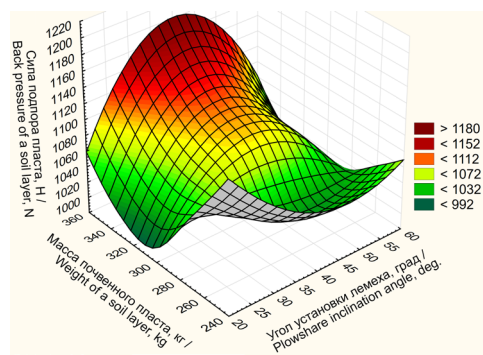
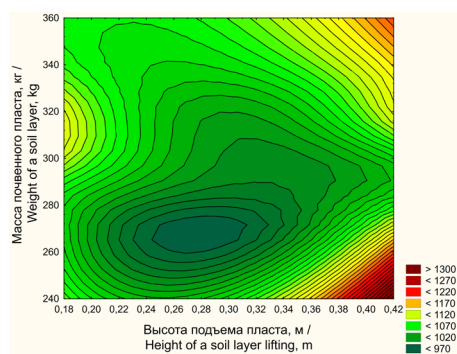
2. Если в качестве постоянного фактора принять высоту подъема пласта $x_2 = 0$ ($h = 0,2$ м), то уравнение регрессии (10), с учетом постоянного фактора, запишется в виде

$$P = 1\,003,325 + 0,663x_1 + 9,038x_3 - 30,072x_1^2 + 16,067x_3^2 + 12,41x_1x_3. \quad (12)$$



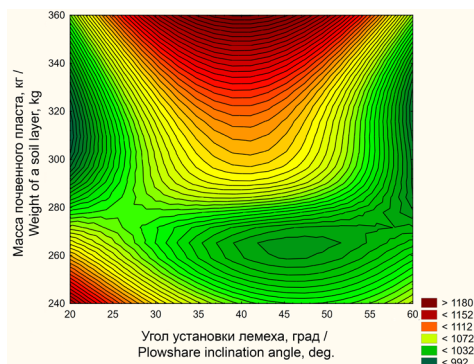
Р и с. 7. Зависимость силы подпора пласта от высоты подъема пласта x_2 и от массы почвенно-клубненосного пласта x_3

F i g. 7. Dependence of the back pressure of a soil layer on the height of the formation x_2 and on the mass of the soil-tuberous layer x_3



Р и с. 8. Зависимость силы подпора пласта от угла установки лемеха x_1 и массы почвенно-клубненосного пласта x_3

F i g. 8. Dependence of the back pressure of a soil layer on the plowshare installation angle x_1 and the mass of the soil-tuberous layer x_3



Из анализа графиков отклика (рис. 8) видно, что экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Оптимальное значение силы подпора пласта составляет $P_{opt} = 1\,002,12$ Н и достигается при значениях факторов $x_1 = 0,044$ (угол установки лемеха $\alpha = 39,21^\circ$), $x_3 = 0,264$ (почвенно-клубненосная масса $m = 286,8$ кг) и $x_2 = 0$ (высота подъема пласта $h = 0,3$ м).

3. Если в качестве постоянного фактора принять почвенно-клубненосную массу $x_3 = 0$ ($m = 300$ кг), то уравнение регрессии (10), с учетом постоянного фактора, запишется в виде

$$P = 1\,003,325 + 0,663x_1 + 0,64x_2 - 30,072x_1^2 + 51,912x_2^2 - 10,967x_1x_2. \quad (13)$$

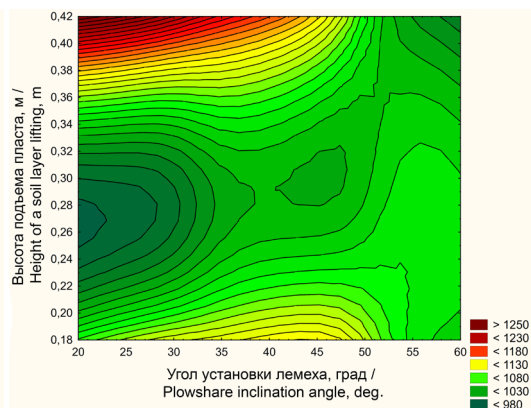
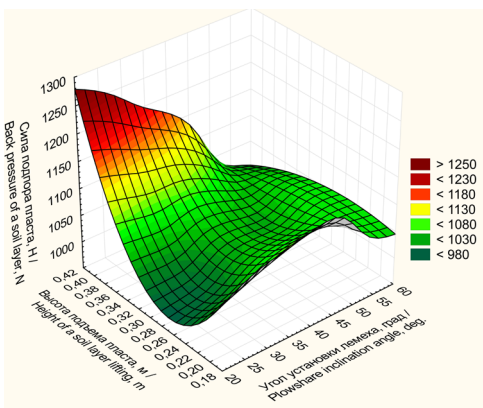
Из анализа графиков отклика (рис. 9) видно, что экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Оптимальное значение силы подпора пласта составляет $P_{opt} = 1\,003,33$ Н и достигается при $x_1 = 0,012$ (угол установки лемеха $40,22^\circ$), $x_2 = -0,005$ (высота подъема пласта $0,299$ м) и $x_3 = 0$ (почвенно-клубненосная масса 300 кг).

Полученные данные полнофакторного исследования подтверждают,

что минимальная сила сгруживания $P_{min} = 1\,001,96$ Н лемеха достигается при угле установки лемеха $\alpha = 40^\circ$ и высоте подъема пласта $h = 0,3$ м. При этом длина лемеха $L = const$.

Обсуждение и заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований можно выбрать рациональный угол наклона лемеха, при котором будут обеспечены минимальные развал пласта на лемехе и сгруживание с учетом типа почвы в зависимости от коэффициента трения почвенного пласта о лемех. Это позволит снизить потери урожая. Предложенные агрегат и способ уборки картофеля минимизируют повреждение клубней и защищают почву от ветровой эрозии. Установленная накопительная емкость в конце агрегата исключает многоразовый проезд транспортной техники по полю и способствует уменьшению уплотнения почвы и снижению ветровой эрозии почвы. Рыхлительные лапы проводят безотвальную обработку почвы, что хорошо предотвращает эрозию. Одна лапа, установленная глубже других, создает противоэрозионную преграду и позволяет сохранить стерни и пожнивные остатки на поверхности поля.



Р и с. 9. Зависимость силы подпора пласта от угла установки лемеха x_1 и высоты подъема пласта x_2

F i g. 9. Dependence of the back of a soil layer pressure on the plowshare installation angle x_1 and the height of a soil layer lifting x_2

Рациональные значения угла наклона лемеха, при котором будут обеспечены минимальные развал пласта на лемехе и сгруживание, колеблются в зависимости от типа почв в следующих пределах:

- для супесчаных (при коэффициенте трения 0,30–0,35) от 35 до 37°;
- для суглинистых (при коэффициенте трения 0,35–0,50) от 32 до 35°;
- для глины (при коэффициенте трения 0,50–0,58) от 30 до 32°.

При предложенном способе уборки картофеля по оптимальному значению угла наклона лемеха можно определить максимальную высоту подъема пласта почвы и задать рациональную глубину

погружения лапы-рыхлителя и удельное сопротивление почвы.

В дальнейшем для повышения эффективности сгруживания лемеха можно разработать систему автоматического контроля режимных и технологических параметров (угла установки и высоты подъема почвенного пласта лемехом) в зависимости от массы сгруженного почвенно-клубненоносного пласта и типа почв.

Данное исследование является перспективным направлением, поскольку позволяет не только снизить потери урожая и эрозию почвы, но и сократить уплотняющее воздействие транспортно-технологических машин на почву при уборке картофеля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Формирование комплекса картофелеуборочных и транспортных машин / И. А. Успенский [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 2. С. 27–31. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
2. Starovoitova O. A., Starovoitov V. I., Manokhina A. A. The Study of Physical and Mechanical Parameters of the Soil in the Cultivation of Tubers [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1172. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012083>
3. Джабборов Н. И., Захаров А. М., Зыков А. В. Метод определения показателей оценки эффективности обработки картофеля аэродинамическим способом // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 77–90. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.077-090>
4. Гаджиев П. И., Рамазанова Г. Г., Манасенков К. А. Повышение эффективности обработки почвы для комбайновой уборки картофеля // Наука в центральной России. 2020. № 4. С. 33–40. doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-4-33-40>
5. Обоснование параметров комкоразрушающего битерного барабана машины для предпосадочной подготовки почвы к комбайновой уборке картофеля / П. И. Гаджиев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 8. С. 15–18. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-8-15-18>
6. Результаты лабораторных исследований просеваемости почвы пруткового элеватора с асимметричным расположением встряхивателей и регулируемым углом наклона полотна / А. С. Дорохов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 380–402. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.380-402>
7. Способ уборки картофеля и агрегат для ее осуществления : патент 1720551 СССР / Гаджиев П. И. [и др.]. № 4774881 ; заявл. 29.12.1989 ; опубл. 23.03.1992. 9 с. URL: <https://findpatent.ru/patent/172/1720551.html> (дата обращения: 15.01.2022).
8. Исследование крошения почвы при ее предпосадочной подготовке к последующей комбайновой уборке картофеля / П. И. Гаджиев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 4. С. 20–23. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-20-23>
9. Comparative Study of the Force Action of Harvester Work Tools on Potato Tubers / A. Siberev [et al.] // Research in Agricultural Engineering. 2019. Issue 3. P. 85–90. doi: <https://doi.org/10.17221/96/2018-RAE>
10. Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M. R. Aerodynamic Properties of Potato Tubers to Airflow Separation from Stones and Clods // International Journal of Vegetable Science. 2019. Vol. 25, Issue 1. P. 87–94. doi: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920>

11. Study of Soil Separation at a Potato Chain with a Cross Rotating Agitator [Электронный ресурс] / М. Y. Kostenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (17–18 October 2019). Vol. 422. Voronezh, 2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012032>
12. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers / М. К. Edrris [et al.] // International Journal of Agricultural & Biological Engineering. 2020. Vol. 13, Issue 2. P. 163–167. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201302.4818>
13. Validating the Parameters of the Rotary Device for Potato Haulm Removal / N. V. Byshov [et al.] // Bioscience Biotechnology Research Communications. 2019. Vol. 12, Issue 5. P. 312–322. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41357405> (дата обращения: 15.01.2022).
14. Ковалев И. В. Ковалева Н. О. Эколого-функциональная роль почв в развитии цивилизации // История и современность. 2009. № 1. С. 93–114. URL: <https://clck.ru/gffZo> (дата обращения: 15.01.2022).
15. Research of Constructive and Regulatory Parameters of the Assembly Working Parts for Potato Harvesting Machines / S. M. Hrushetsky [et al.] // Agricultural Engineering. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 101–110.
16. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна / И. А. Успенский [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 1. С. 262–269. URL: <https://clck.ru/gfacw> (дата обращения: 15.01.2022).
17. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology / Z. Wei [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2019. Vol. 12, Issue 5. P. 71–80. URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (дата обращения: 15.01.2022).
18. Features of Applying Biological Preparations in the Technology of Potato Growing on Gray Forest Soils / D. V. Vinogradov [et al.] // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7, Issue 4. P. 242–246. URL: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/23752> (дата обращения: 15.01.2022).
19. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas / J. G. Zhou [et al.] // INMATEH Agricultural Engineering. 2021. Vol. 64, Issue 2. P. 151–158. doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-64-14>
20. Improving the Working Bodies of the Harvesting Machines by Means of the Use of Composite Materials [Электронный ресурс] / N. Zhanov [et al.] // BIO Web of Conferences. 2020. Vol. 17. URL: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7400387> (дата обращения: 15.01.2022).

Поступила 20.01.2022; одобрена после рецензирования 18.02.2022; принята к публикации 03.03.2022

Об авторах:

Гаджиев Парвиз Имранович, декан факультета электроэнергетики и технического сервиса Российского государственного аграрного заочного университета (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: [DNC-7890-2022](https://orcid.org/0000-0001-5643-4930), pgadjiev@yandex.ru

Шестакова Елена Владимировна, врио ректора Российского государственного аграрного заочного университета (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5643-4930>, missislysik@mail.ru

Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна, доцент кафедры природообустройства и водопользования Российского государственного аграрного заочного университета (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: [CPQ-5874-2022](https://orcid.org/0000-0003-2758-9479), Scopus ID: [56072031000](https://orcid.org/0000-0003-2758-9479), gulbike@yandex.ru



Заявленный вклад авторов:

П. И. Гаджиев – научное руководство, постановка задачи исследования.

Е. В. Шестакова – литературный и патентный анализ данных, формулирование основной концепции исследования.

Г. Г. Рамазанова – разработка математической зависимости, критический анализ полученных результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Machnev A.V., Golikov A.A. Creating an Integrated System of Potato Harvesters and Transport Vehicles. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021.(2):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>

2. Starovoitova O.A., Starovoitov V.I., Manokhina A.A. The Study of Physical and Mechanical Parameters of the Soil in the Cultivation of Tubers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1172. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012083>

3. Dzhabborov N.I., Zakharov A.M., Zykov A.V. Method to Determine the Efficiency Assessment Indicators of Potato Treatment by the Aerodynamic Method. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(1):77–90. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.077-090>

4. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Manaenkov K.A. Improving the Efficiency of Tilling the Soil for Combine Harvesting Potatoes. *Science in the Central Russia*. 2020;(4):33–40. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-4-33-40>

5. Gadzhiev P.I., Shikalov M.S., Ramazanova G.G., Alekseev A.I. Substantiation of the Parameters of a Lump Crushing Beater Drum of a Machine for Preplanting Soil Preparation for Potato Combine Harvesting. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019.(8):15–18. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-8-15-18>

6. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Results of Laboratory Studies of Soil Sifting in a Rod Elevator with Asymmetric Arrangement of Web Agitators and Adjustable Elevator Apron Angle. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(3):380–402. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.380-402>

7. Gadzhiev P.I., Akhmedov I.I., Sorokin A.A., et al. [Potato Harvesting Method and Machine for Its Implementation]. Patent 1,720,551 USSR. 1992 March 23. 9 p. Available at: <https://findpatent.ru/patent/172/1720551.html> (accessed 15.01.2022). (In Russ.)

8. Gadzhiev P.I., Shikalov M.S., Ramazanova G.G., Alekseev A.I. The Study of Soil Crumbling during Its Preplant Preparation for the Subsequent Combine Harvesting of Potatoes. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(4):20–23. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-20-23>

9. Sibirev A., Aksenov A., Dorokhov A., Ponomarev A. Comparative Study of the Force Action of Harvester Work Tools on Potato Tubers. *Research in Agricultural Engineering*. 2019;(3):85–90. doi: <https://doi.org/10.17221/96/2018-RAE>

10. Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M.R. Aerodynamic Properties of Potato Tubers to Airflow Separation from Stones and Clods. *International Journal of Vegetable Science*. 2019;25(1):87–94. doi: <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920>

11. Kostenko M.Y., Ruzimurodov A.A., Byshov D.N., et al. Study of Soil Separation at a Potato Chain with a Cross Rotating Agitator. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming (17–18 October 2019). Vol. 422. Voronezh; 2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012032>

12. Edris M.K., Al-Gaadi K.A., Hassaballa A.A., et al. Impact of Soil Compaction on the Engineering Properties of Potato Tubers. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*. 2020;13(2):163–167. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201302.4818>

13. Byshov N.V., Borychev S.N., Abramov Yu.N., et al. Validating the Parameters of the Rotary Device for Potato Haulm Removal. *Bioscience Biotechnology Research Communications*. 2019;12(5):312–322. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41357405> (accessed 15.01.2022).
14. Kovalev I.V. Kovaleva N.O. [The Ecological and Functional Role of Soils in the Development of Civilization]. *Istoriya i sovremennost*. 2009;(1):93–114. Available at: <https://clck.ru/gffZo> (accessed 15.01.2022). (In Russ.)
15. Hrushetsky S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., et al. Research of Constructive and Regulatory Parameters of the Assembly Working Parts for Potato Harvesting Machines. *Agricultural Engineering*. 2019;59(3):101–110.
16. Uspenskiy I.A., Rymbalovich G.K., Kostenko M.U., Beznosyuk R.V. Assessment of Prospective Technological Schemes Potato Harvester. *News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2018;(1):262–269. Available at: <https://clck.ru/gfacw> (accessed 15.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Wei Z., Li H., Mao Y., et al. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019;12(5):71–80. Available at: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (accessed 15.01.2022).
18. Vinogradov D.V., Terekhina O.N., Byshov N.V., et al. Features of Applying Biological Preparations in the Technology of Potato Growing on Gray Forest Soils. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018;7(4):242–246. Available at: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/23752> (accessed 15.01.2022).
19. Zhou J.G., Yang Sh.M., Li M.Q., et al. Design and Experiment of a Self-Propelled Crawler-Potato Harvester for Hilly and Mountainous Areas. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2021;64(2):151–158. doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-64-14>
20. Zhanov N., Byshov N., Kostenko N., et al. Improving the Working Bodies of the Harvesting Machines by Means of the Use of Composite Materials. *BIO Web of Conferences*. 2020;17. Available at: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7400387> (accessed 15.01.2022).

Submitted 20.01.2022; approved after reviewing 18.02.2022; accepted for publication 03.03.2022

About the authors:

Parviz I. Gadzhiev, Dean of the Faculty of Electric Power Engineering and Technical Services, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, pgadjiev@yandex.ru

Elena V. Shestakova, Acting Rector, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), Cand.Sci. (Agric.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5643-4930>, missislysik@mail.ru

Gyulbike G. Ramazanova, Associate Professor of the Chair of Environmental Engineering and Water Management, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: CPQ-5874-2022, Scopus ID: 56072031000, gulbike@yandex.ru

Contribution of the authors:

P. I. Gadzhiev – scientific guidance, formulation of the research task.

E. V. Shestakova – literature and patent data analysis, formulation of the main research concept.

G. G. Ramazanova – development of mathematical dependence, critical analysis of the obtained results.

All authors have read and approved the final manuscript.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT


УДК 621.31


doi: 10.15507/2658-4123.032.202202.279-294

Научная статья



Построение квазиоптимальной по быстродействию и энергозатратам замкнутой системы управления электроустановкой

В. С. Хорошавин , **В. С. Грудинин**
Вятский государственный университет
(г. Киров, Российская Федерация)

 khoroshavin@vyatsu.ru

Аннотация

Введение. Эффективность и работоспособность электротехнологических процессов и установок в динамических режимах их функционирования характеризуются быстродействием, низкими энергозатратами, точностью в переходных процессах и устойчивостью желаемого конечного состояния. Предлагается на базе особого оптимального управления совместить построение систем перехода и стабилизации как в части определения алгоритма управления с минимальными энергозатратами в функции состояний объекта, так и в части определения параметров и условий движения с минимальным отклонением от заданной траектории. Последнее обеспечивает в устойчивой замкнутой системе программного движения эффективные решения по критериям быстродействия и энергосбережения.

Материалы и методы. В качестве основного метода нахождения оптимального программного управления используется принцип максимума, дополненный для исследования особых режимов аппаратом условий общности положения для нелинейных объектов с расширением пространства координат, учитывающий вхождение времени и критерий оптимальности. Аппарат условий общности положения использован для решения задач энергосбережения путем линеаризации в большом исходного объекта. Квазиоптимальность по быстродействию и энергозатратам достигается минимизацией энергии по параметру программного движения, противоречиво влияющему на время переходного процесса и амплитуду управления.

Результаты исследования. Для оценки вычислительных трудностей, быстродействия, энергосбережения, точности и устойчивости приведен пример управления инерционным объектом по различным критериям. Получена структура простой в технической реализации замкнутой квазиоптимальной системы со стационарной обратной связью.
Обсуждение и заключение. Формализованность подхода к построению квазиоптимальных систем на основе условий общности положения позволяет использовать

© Хорошавин В. С., Грудинин В. С., 2022



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

его в задачах многокритериальной оптимизации и системах автоматизированного проектирования энергоемких промышленных, транспортных, сельскохозяйственных электроустановок.



Ключевые слова: электроустановка, оптимальное управление, быстродействие, энергозатраты, программное движение, принцип максимума, особое управление, условия общности положения, устойчивость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хорошавин В. С., Грудинин В. С. Построение квазиоптимальной по быстродействию и энергозатратам замкнутой системы управления электроустановкой // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 279–294. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.279-294>

Original article

Developing a Quasi-Optimal, in Terms of Transition Time and Energy Consumption, Closed-Loop Control System for an Electrical Installation

V. S. Khoroshavin , V. S. Grudinin
Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)
 khoroshavin@vyatsu.ru

Abstract

Introduction. The efficiency and normal work of electrotechnological processes and installations in their operation dynamic modes is characterized by the time of transition from initial to final state, low energy consumption, accuracy in transients and stability of the desired final state. It is proposed, from a single position on the basis of special optimal control, to combine transition and stabilization systems both in terms of determining the control algorithm with minimal energy consumption in the function of the object states and determining the parameters and conditions of movement with minimal deviation from a given trajectory providing the optimal transmission time and energy saving in a stable closed system of an object control.

Materials and Methods. The principle of maximum is used as the main method for finding optimal program control, which for the study of special modes was supplemented with the apparatus of the position generality conditions for nonlinear objects with the coordinate space expansion, taking into account the occurrence of time and optimality criterion. The position generality apparatus is also used to solve energy-saving problems through using linearization in a large source object. Quasi-optimality in terms of transition time and energy consumption is achieved through minimizing energy according to the program motion parameter, which has a contradictory effect on the transition time and control amplitude.

Results. To assess computational difficulties, transition time, energy saving, accuracy and stability, an example of inertial object control according to various criteria is given. The structure of a closed quasi-optimal system with stationary feedback, which is simple in technical implementation, is obtained.

Discussion and Conclusion. The formalization of the approach to the construction of quasi-optimal systems based on the position generality allows it to be used in multi-criteria optimization tasks and computer-aided design systems for energy-intensive industrial, transport, and agricultural electrical installations.

Keywords: electrical installation, optimal control, time transition, energy consumption, program motion, maximum principle, special control, position generality conditions, stability

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

For citation: Khoroshavin V.S., Grudin V.S. Developing a Quasi-Optimal, in Terms of Transition Time and Energy Consumption, Closed-Loop Control System for an Electrical Installation. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):279–294. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.279-294>

Введение

Для электротехнических процессов и установок актуальна задача повышения эффективности работы, так как 70 % вырабатываемой электроэнергии потребляют электроприводы, 10 % – электротермические установки¹. Установки инфракрасного излучения, светотехнические и насосные установки являются энергоемкими в современных технологиях выращивания сельскохозяйственных культур в защищенном грунте [1]. Многие процессы и установки, особенно тепловые, имеют большую инерционность, то есть длительные динамические режимы перехода в устойчивое требуемое выходное состояние. Динамические режимы электроустановок как объектов управления с достаточной точностью описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, а в качестве управляющих воздействий служат ограниченные электрические переменные: обычно амплитуда, частота или скажность напряжения или тока.

В технических приложениях задачи оптимального перехода формулируются как задачи быстродействия, на минимум ресурсов (энерго- и ресурсосбережения) и точности (программного движения). Утверждается, что оптимальное энергосберегающее управление электрической сушильной камерой позволяет при определенных граничных условиях сэкономить до

60 % потребляемой электроэнергии [2]. Но известные алгоритмы оптимального быстродействия и энергосбережения отыскиваются в виде программного (то есть в функции времени) управления, не обеспечивают устойчивости конечного состояния объекта и в лучшем случае могут быть реализованы в форме нестационарной обратной связи.

Цель работы – применить особое оптимальное управление в качестве единого подхода для нахождения алгоритма управления с минимальными энергозатратами в функции состояний объекта, а также определить параметры и условия программного движения, обеспечивающие эффекты быстродействия и энергосбережения в устойчивой замкнутой системе управления электроустановкой.

Обзор литературы

Для решения оптимальных задач в технических приложениях используется принцип максимума Понтрягина, так как он, в отличие от классического вариационного исчисления, позволяет найти кусочно-непрерывное управление и учесть ограничения на переменные объекта². Оптимальное управление отыскивается как функция зависящих от времени вспомогательных переменных, вводимых принципом максимума. Но в задачах быстродействия и на минимум ресурсов, нелинейных по координатам с линейным управлением, возможно существование особого

¹ Браславский И. Я., Ишматов Э. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод : учеб. пособие для вузов. М. : Издательский центр «Академия», 2004. 256 с. URL: <http://log-in.ru/books/energoberegayushiiy-asinkhronnyiy-elektroprivod-braslavskiiy-i-ya-ishmatov-z-sh-polyakov-v-n-tekhnika/> (дата обращения: 20.01.2022) ; Автоматическое управление электротермическими установками : учебник для вузов / А. Д. Свенчанский [и др.]. М. : Энергоатомиздат, 1990. 416 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001521815> (дата обращения: 20.01.2022).

² Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. М. : Наука, 1969. 384 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006401476> (дата обращения: 20.01.2022).

режима, когда принцип максимума не устанавливает однозначной связи между оптимальным управлением и вспомогательными переменными³. Известные способы вычисления особого управления используют вспомогательные переменные непосредственно или с помощью скобок Пуассона [3; 4]. Найти решение для вспомогательных переменных, даже в функции времени, сложно, а для построения замкнутой системы в функции координат, позволяющей компенсировать действующие на объект возмущения, невозможно из-за неразрешимости двухточечной граничной задачи, к которой сводится решение оптимальной задачи. В задачах энергосбережения с квадратичным по управлению критерием особых режимов не возникает, но даже если оптимальное управление в функции времени будет получено, то синтез замкнутой системы осуществляется с помощью зависящих от времени и граничных условий обратных связей [2]. Тогда как для простоты технической реализации системы требуются стационарные обратные связи.

Для достижения предельного быстродействия или минимума ресурсов в задачах с линейным управлением необходимо кусочно-постоянное управление с максимально возможными амплитудами воздействия, что ведет к перерегулированию координат, а моменты переключения определяются нелинейными нестационарными поверхностями переключения или стыковки особых и неособых траекторий [5; 6]. Поэтому алгоритмы оптимального быстродействия неприменимы в задачах программного движения

или оптимального по точности управления по достижению минимального отклонения от заданной траектории, особенно для объектов с длительными и частыми динамическими режимами перехода [7]. К тому же при оптимальном быстродействии не обеспечивается устойчивость конечного состояния в отличие от программного движения, гарантирующего ее на полубесконечном интервале времени.

Что касается связи решений задач управления с критериями быстродействия и энергосбережения, то известны противоположные точки зрения: от их полного противопоставления, что объясняется необходимостью больших энергозатрат для увеличения быстродействия, до их полного совпадения, что справедливо при управлении в большом, когда при больших диапазонах задания начального и конечного состояний выхода минимальные энергозатраты получаются при максимально возможном управлении, то есть как в задаче быстродействия⁴ [8]. Сравнительные анализы оценки критериев быстродействия, энергозатрат и точности (программного движения) выполнены при управлении реальными тепловыми процессами в металлургии и теплоснабжении [9–11]. На основе анализа особых, в смысле принципа максимума, режимов в задачах с линейным входением управления показано, что алгоритмы оптимальных управлений по быстродействию и на минимум ресурсов совпадают, если критерий на минимум ресурсов физически адекватно отражает поступление энергии в управляемый процесс [12].

³ Габасов Р., Кириллова Ф. М. Особые оптимальные управления. М. : Наука, 1973. 314 с. URL: https://litgu.ru/knigi/tehnicheskie_nauki/308008-osobyie-optimalnye-upravleniya.html (дата обращения: 20.01.2022).

⁴ Макеева А. В. Оптимальное по быстродействию управление одной линейной системой второго порядка // Сборник докладов всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Фундаментальные и прикладные проблемы механики, математики, информатики». Пермь : ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 2015. С. 68–71. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24231084&pf=1> (дата обращения: 24.01.2022).

Исходя из обзора литературы, можно говорить об актуальности разработки подхода по совмещенному определению алгоритма управления на базе принципа максимума и его особенностей в функции состояний объекта. Подход важен для построения устойчивой замкнутой системы управления.

Материалы и методы

Пусть математическое описание объекта управления (электроустановки) задается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, нелинейных по координатам с линейным скалярным управлением в векторно-матричной форме:

$$\dot{x} = A(x) + B(x)U, \quad (1)$$

где $x \in R_n$ – вектор координат объекта; U – управление, $0 \leq U \leq 1$; элементы вектор-столбцов $A(x)$, $B(x)$ непрерывны и дифференцируемы по x .

Задачами системы управления являются, во-первых, выработка ограниченного управления в функции времени или координат, переводящего объект из начального состояния $x(0)$ в конечное $x(T)$ за заданное или заранее заданное время и обеспечивающего минимум критерию оптимальности в виде интегрального функционала, учитывающего временные или энергетические затраты или отклонение текущей траектории от заданной (задача оптимального управления); во-вторых, последующая стабилизация конечного состояния в замкнутой системе со стационарными обратными связями (задача устойчивости или, в конечном счете, обеспечения работоспособности установки).

Для решения первой задачи оптимального управления с определением

существования особого режима и вычисления особого управления в явном виде от координат и параметров нелинейного объекта, что необходимо на практике для синтеза замкнутой системы с обратной связью, применим аппарат условий общности положения (УОП) для нелинейных объектов. УОП был выведен в работе В. А. Олейникова для задач быстрогодействия и расширен для задач на минимум ресурсов в одном из наших исследований⁵.

Покажем применение УОП для нелинейных объектов в расширенном пространстве координат в задаче программного движения с критерием

$$I = \int_0^T (x_{n_{\text{тр}}}(t) - x_n(t))^2 dt, \quad (2)$$

учитывающим квадратичные отклонения текущей выходной координаты объекта от требуемой [13]. Задача (1), (2) является нелинейной по координатам, поэтому в ней при использовании принципа максимума, даже для линейных объектов, возможно возникновение особых ситуаций, если на некотором интервале времени $t \in [t_1, t_2]$:

$$\frac{d^k(\psi, B(\tilde{x}))}{dt^k} = 0, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где ψ – вектор вспомогательных переменных, вводимых принципом максимума, из уравнения

$$\frac{d\psi}{dt} = - \left(\frac{\partial A(\tilde{x})}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial B(\tilde{x})U}{\partial \tilde{x}} \right)^T \psi.$$

Условие существования особого режима (3) требует анализа вспомогательных переменных $\psi(t)$. Чтобы его избежать, в аппарате УОП вычисляются

⁵ Олейников В. А. Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. Л. : Недра, 1982. 216 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001089712> (дата обращения: 24.01.2022); Хорошавин В. С., Зотов А. В. Особое оптимальное управление нелинейными объектами : моногр. Киров : Науч. изд-во ВятГУ, 2019. 219 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37523319> (дата обращения: 24.01.2022).

векторы $B_j, j = 2, \dots, n + 2$, по рекуррентному соотношению:

$$B_1(\tilde{x}) = B(\tilde{x}),$$

$$B_j = \frac{\partial B_{j-1}}{\partial U} \frac{dU}{dt} - \left(\frac{\partial A(\tilde{x})}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial B(\tilde{x})U}{\partial \tilde{x}} \right) B_{j-1} + \frac{\partial B_{j-1}}{\partial \tilde{x}} \frac{d\tilde{x}}{dt}, \quad (4)$$

где $\tilde{x} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x \\ x_{n+1} \end{pmatrix}, A(\tilde{x}) = \begin{pmatrix} (x_{n\text{ тр}}(t) - x_n(t))^2 \\ A(x) \\ 1 \end{pmatrix},$

$$B(\tilde{x}) = \begin{pmatrix} 0 \\ B(x) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

После образования матрицы D_{n+2} размером $(n + 2) \cdot (n + 2)$ из векторов $(B_1 \dots B_{n+2})$ и приравнивания к нулю определителя $\det D_{n+2} = 0$ находятся уравнения особых траекторий и особых управлений, множество которых можно расширить путем приравнивания к нулю функциональных элементов матрицы D_{n+2} , так как при этом тождественно выполняются условия особого режима (3).

При исследовании функциональных элементов матрицы D_{n+2} учитываются не только особые режимы задачи программного движения, но и задач быстродействия и на минимум ресурсов с линейным управлением, так как в матрицу D_{n+2} вложены матрицы

$$D_n = \begin{pmatrix} b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{pmatrix} \text{ и } D_{n+1} = \begin{pmatrix} b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix},$$

проверяемые в этих задачах. Таким образом, свойства оптимального по быстродействию управления являются характерными для объекта и сохраняются при других критериях оптимальности, а в целом проверка УОП позволяет выявить общие свойства оптимального управления в задачах быстродействия, на минимум ресурсов и программного движения.

Интегральный критерий энергозатрат для большинства электротехнических устройств имеет вид

$$I = \int_0^T U^2 dt. \quad (5)$$

Как и М. Атанс и П. Фалб, предположим, что « $U(t)$ – скаляр, пропорциональный напряжению или току, тогда величина $U^2(t)$ пропорциональна мощности, а $\int_{t_0}^T U^2 dt$ пропорционален энергии, израсходованной на интервале $[t_0, T]$ »⁶. Такой критерий энергозатрат используется в большинстве работ, но иногда, как заметил Ю. П. Петров, «в задачах частотного управления рекомендуется использовать критерий $\int_{t_0}^T U^{1.5} dt$, так как потери на гистерезис и вихревые токи пропорциональны соответственно первой и второй степени частоты электрического сигнала»⁷.

Задача энергосбережения (1), (5) нелинейна по управлению, поэтому особых режимов в ней не возникает, и при ее решении можно однозначно выразить оптимальное программное управление, как отмечает В. И. Ловчаков, через вспомогательные переменные с помощью принципа максимума или множители Лагранжа в классическом вариационном исчислении или методом динамического программирования [2].

⁶ Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. М. : Машиностроение, 1968. 734 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005951981> (дата обращения: 24.01.2022).

⁷ Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву. Л. : Энергия, 1971. 144 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007323479> (дата обращения: 24.01.2022).

Чтобы исключить трудоемкую операцию нахождения дополнительных переменных, предложен способ поиска дифференциального уравнения для оптимального управления в функции координат объекта, основанный на применении аппарата УОП для нелинейных объектов, для чего производится приведение исходной задачи (1), (5) к редуцированной задаче с линейным входением управления, в которой возможно существование особого режима. Как мы писали в одной из предыдущих работ, «УОП для нелинейных объектов в расширенном пространстве координат R_{n+2} применяются к редуцированной задаче энергосбережения (1), (5):

$$\begin{cases} \dot{x}^0 = y, \\ \dot{x} = A(x) + B(x)x^0, \\ \dot{x}_{n+1} = (x^0)^2. \end{cases}$$

Из выражения для детерминанта и элементов матрицы $D_{n+2} = (B_1 B_2 \dots B_n B_{n+1} B_{n+2})$, вычисленных с учетом замены U на y по рекуррентному соотношению (4), в общем случае получается множество особых управлений y и его производных по времени в функции координат редуцированного объекта

$$\det D_{n+2} = F_0(x, x^0, y, \dot{y}, \dots) = 0,$$

а после обратной замены переменных управления в редуцированной задаче на переменные управления в исходной задаче

$$x^0 = U, \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} y = \frac{d^k}{dt^k} U, k = 1, 2, 3, \dots$$

получается дифференциальное уравнение для оптимального программного

управления в функции координат исходного объекта»⁸. А именно:

$$F(x, U, \dot{U}, \ddot{U}, \dots) = 0.$$

Постоянные интегрирования в общем решении системы дифференциальных уравнений объекта (1) и дифференциального уравнения для оптимального программного управления (6) определяются из решения двухточечной граничной задачи для заданных состояний выхода объекта и его $(n - 1)$ производных в начальный и конечный фиксированный момент времени T . Получаемое управление и соответствующие фазовые траектории являются трансцендентными функциями от времени, и замкнутая система может быть реализована с помощью нелинейных функциональных преобразователей, нестационарной обратной связи или путем аппроксимации траекторий и управления [2; 14–16].

Что касается второй задачи, стабилизации, то алгоритмы быстрогодействия и энергосбережения не обеспечивают устойчивость конечного состояния. Алгоритм программного движения может гарантировать устойчивость, поэтому для его эффективности по быстродействию и энергосбережению предлагается ввести в желаемый закон движения выходной координаты объекта такой параметр τ , который противоречиво влияет на время переходного процесса T и амплитуду управляющего воздействия U . Таким параметром, исходя из физических соображений по второму закону Ньютона, может быть мера инерционности процесса. Если взять апериодическое звено первого порядка с дифференциальной связью $\tau \dot{x} = U - x$, то T прямо пропорционально τ и составляет $(3 \div 4)\tau$, а амплитуда U обратно пропорциональна τ . Тогда

⁸ Хорошавин В. С., Зотов А. В. Особое оптимальное управление нелинейными объектами.

выбор параметра τ дает эффективные решения для значений T и U , так как нельзя уменьшить значение одного, не увеличивая значение другого⁹. Найти оптимальные значения быстродействия T и энергии E как интеграла от квадрата управления U можно из экстремума энергии E по параметру τ при переходе из начального состояния $x_{\text{нач}}$ в конечное $x_{\text{кон}}$ за время T по условию

$$\frac{\partial E(x_{\text{нач}}, x_{\text{кон}}, \tau, U, T)}{\partial \tau} = 0. \quad (7)$$

Если при вычисленном по (7) $\tau_{\text{опт}}$ выполняются ограничения по управлению и координатам, то в задаче программного движения с критерием (2) при

$$x_{\text{нтр}}(t) = x_{\text{нач}} e^{-t/\tau_{\text{опт}}} + x_{\text{кон}} \left(1 - e^{-t/\tau_{\text{опт}}}\right) \quad (8)$$

обеспечивается квазиоптимальное (в смысле локальной оптимальности, в отличие от глобальной оптимальности при оптимальном программном управлении) управление по быстродействию и энергозатратам.

Устойчивость квазиоптимальной системы можно проверить по функции Ляпунова методами качественной теории дифференциальных уравнений или критериев устойчивости [17]. Структура замкнутой квазиоптимальной системы для линейных объектов управления содержит линейные стационарные обратные связи с коэффициентами передачи, зависящими от параметра $\tau_{\text{опт}}$.

Результаты исследования

Покажем применение предложенных на основе особого оптимального управления подходов в решении задач оптимального и квазиоптимального управления линейным объектом, динамика которого описывается линейным дифференциальным уравнением

$$\dot{x}_1 = U - x_1, \quad (9)$$

где коэффициент усиления и постоянная времени равны 1, на управление и состояние наложены ограничения $0 \leq U \leq 1, 0 \leq x_1 \leq 1$. Граничные условия $x_{1\text{нач}} = 0, x_{1\text{кон}} = x_k$. Выбор объекта объясняется меньшей громоздкостью вычислений и большей прозрачностью результатов для оценки вычислительных, временных и энергетических затрат и оценки устойчивости получаемых решений.

Задача оптимального энергосберегающего управления

УОП в расширенном пространстве координат R_3 применяются к редуцированной задаче

$$\begin{cases} \dot{x}^0 = y, \\ \dot{x}_1 = x^0 - x_1, \\ \dot{x}_2 = (x^0)^2. \end{cases}$$

Вычисляются векторы $B_j, j = 1, 2, 3$, по соотношению (4), и образуется матрица D_3 :

$$D_3 = (B_1 \quad B_2 \quad B_3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & -2x^0 & -2y \end{pmatrix}.$$

Из $\det D_3 = 0$ определяется особое управление в редуцированной задаче $y - x^0 = 0$, после перехода к оптимальному управлению в исходной задаче решается система дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = U - x_1, \\ \dot{U} = U. \end{cases}$$

Общим решением системы дифференциальных уравнений объекта и управления являются

⁹ Евланов Л. Г. Теория и практика принятия решений. М. : Экономика, 1984. 176 с. URL: <https://hram-sveta.ru/9189-teoriya-i-praktika-prinyatiya-resheniy.html> (дата обращения: 24.01.2022).

$$\begin{cases} x_1(t) = C_1 e^t + C_2 e^{-t}, \\ U(t) = 2C_1 e^t. \end{cases}$$

$$I = \int_0^T \left(x_k \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - x_1 \right)^2 dt,$$

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий. Пусть $x_1(0) = 0$, $x_{1\text{кон}} = 0,5$ при $T = 2$. Графики переходных процессов для координаты $x_1^*(t) = 0,069(e^t + e^{-t})$ и оптимального программного управления $U^*(t) = 0,138e^t$ приведены на рисунке 1. При этом затраты энергии $E = \int_0^2 (U^*(t))^2 dt = 0,52$, что на 30,7 % меньше, чем энергозатраты в разомкнутой системе с управлением $U^*(t) = 0,5$ на интервале времени $t \in [0, 3]$. Но аналитически выразить U^* через x_1^* из-за трансцендентности невозможно, к тому же нужно будет дополнительно решать задачу стабилизации конечного состояния.

Задача квазиоптимального управления

Рассмотрим задачу программного движения для объекта (9) с критерием

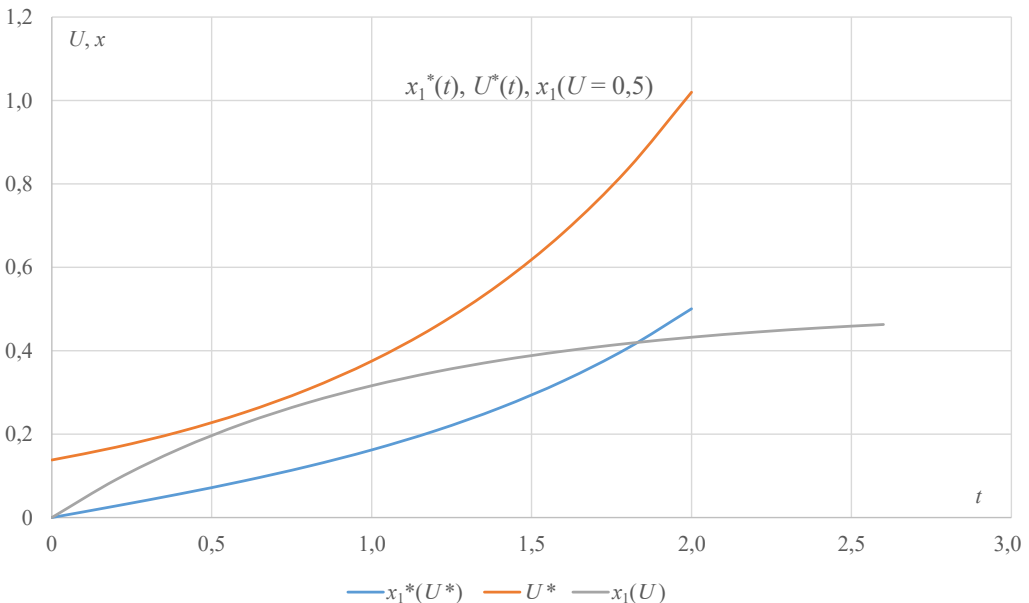
учитывающим переход из $x_1(0) = 0$ в $x_1(T \rightarrow \infty) = x_k$ с минимальными квадратичными отклонениями от переходного процесса аperiodического звена $\tau \dot{x} = U - x$ с $U = x_k$.

Применим УОП в расширенном пространстве координат R_3 к поставленной задаче

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = 1, \\ \dot{x}_1 = U - x_1, \\ \dot{x}_2 = \left(x_k \left(1 - e^{-\frac{x_0}{\tau}} \right) - x_1 \right)^2. \end{cases}$$

После вычисления векторов $B_j, j = 1, 2, 3$, по соотношению (4) образуем матрицу $D_3 = (B_1 B_2 B_3)$:

$$D_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix},$$



Р и с. 1. Траектории x_1^* и U^* оптимального программного управления

Fig. 1. Trajectories x_1^* and U^* of optimal programmed control

из элементов которой

$$b_{32} = 2x_k \left(1 - e^{-\frac{x_0}{\tau}} \right) - 2x_1,$$

$$b_{33} = 2 \left(x_k \left(1 - e^{-\frac{x_0}{\tau}} \right) - x_1 \right) + 2 \frac{x_k e^{-\frac{x_0}{\tau}}}{\tau} - 2U + 2x_1$$

определяются в функции времени особая траектория, совпадающая с желаемой по критерию (10), и особое управление, являющееся оптимальным в задаче программного движения

$$U(t, x_k, \tau) = x_k \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \left(\frac{1 - \tau}{\tau} \right) \right). \quad (11)$$

После исключения времени в последних находится управление в замкнутой системе, линейно зависящее от координаты x_1 :

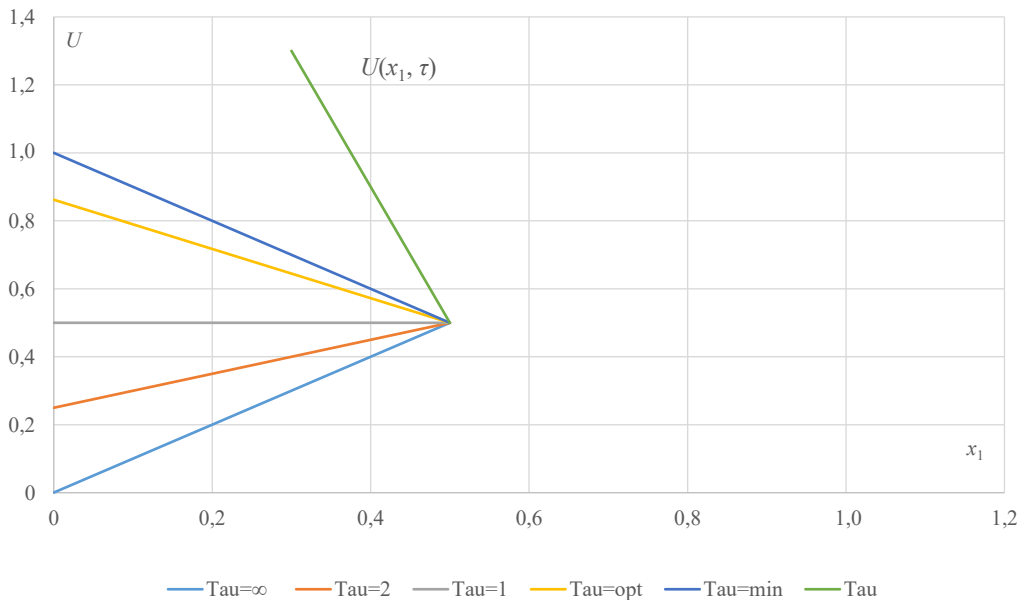
$$U(x_1, x_k, \tau) = \frac{x_k - x_1(1 - \tau)}{\tau}. \quad (12)$$

На рисунке 2 приведена графическая иллюстрация связей между переменными в уравнении (12). Из уравнений (11) и (12) следует, что начальная амплитуда управления $U(x_1(0) = 0)$ обратно пропорциональна параметру τ . При $\tau \leq \tau_{\min}$ (рис. 2) начальный участок управления в программном движении, как в задаче быстродействия, принадлежит ограничению на управление $U = 1$ и чем больше x_k , тем при больших τ_{\min} выходим на это ограничение, что следует и из связи

$$U(x_1(0) = 0) \leq 1 = \frac{x_{k \max}}{\tau_{\min}}$$

что при больших диапазонах заданных граничных условий в программном движении исчезает эффект энергосберегающего управления и оно приближается к оптимальному управлению по быстродействию [2].

Величина энергии, затрачиваемой на переход из $x_1(0) = 0$ в x_k за время $T = 3\tau$ при управлении (13), равна



Р и с. 2. Связи переменных в программном движении
F i g. 2. Relationships of variables in the program motion

$$E = \int_0^{3\tau} (U(t, x_k, \tau))^2 dt = x_k^2 \frac{(3\tau^2 + 2\tau + 1)}{2\tau}.$$

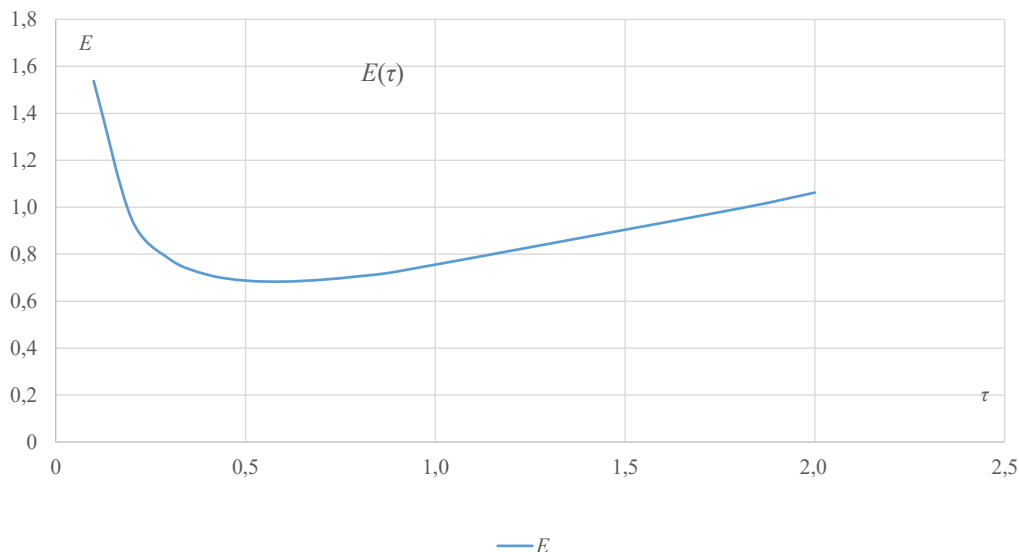
Минимум энергии E по параметру τ определится из условия

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = x_k^2 \frac{(3\tau^2 - 1)}{2\tau^2} = 0,$$

откуда $\tau_{\text{опт}} = 0,58$. Отметим, что полученный параметр $\tau_{\text{опт}}$ не зависит от x_k . Зависимость энергии E от параметра τ при $x = 0,5$ показана на рисунке 3. Спадающий в положительном направлении τ участок функции $E(\tau)$ характеризует эффективные по быстродействию и энергозатратам режимы [18]. Оптимальное в программном движении решение с $\tau_{\text{опт}} = 0,58$ дает 9,3 % относительной экономии энергии, по сравнению с управлением в разомкнутой системе с $\tau = 1$, что существенно ниже 30,7 % экономии энергии при оптимальном программном управлении, но при программном движении обеспечивается устойчивость конечного состояния.

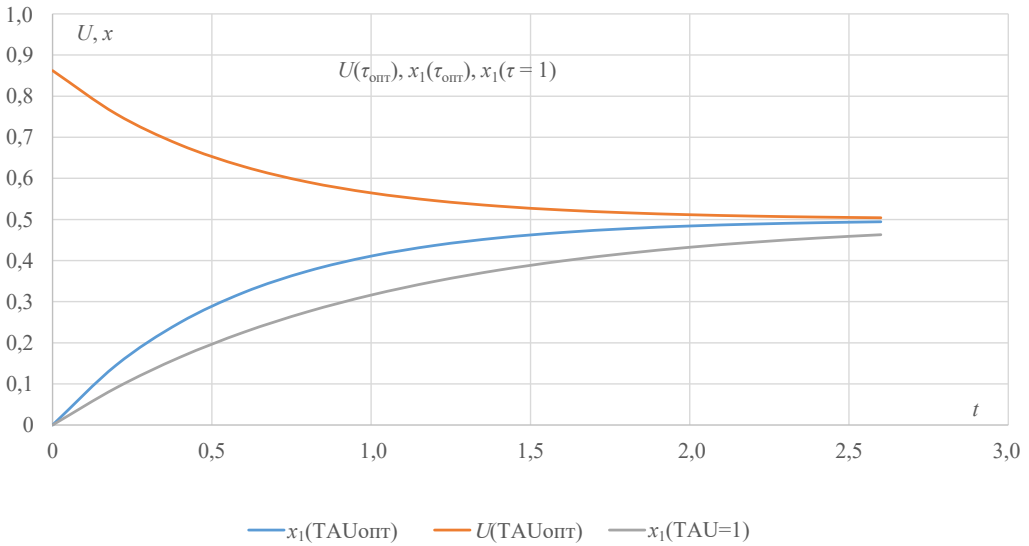
При выборе $x_k > \tau_{\text{мин}}$, то есть, когда $\tau_{\text{мин}} > \tau_{\text{опт}}$ (рис. 2, 3), переходим на восходящую ветвь функции $E(\tau)$, быстродействие и энергозатраты непротиворечивы, их эффекты хотя и снижаются, но сохраняются по сравнению с $\tau = 1$. Отметим, что выбор меньшего τ дает больший эффект по быстродействию или производительности установки, чем эффект по энергозатратам, что следует из слабой вогнутости кривой $E(\tau)$. При больших x_k наблюдается более выраженный экстремум в зависимости $E(\tau)$. Графики переходных процессов в программном движении с $\tau_{\text{опт}} = 0,58$ и $\tau = 1$ для $x_k = 0,5$ приведены на рисунке 4.

Структура позиционной системы управления, квазиоптимальной по быстродействию и энергозатратам, полученная из (12) с $\tau_{\text{опт}}$ и технически просто реализуемая, приведена на рисунке 5. Если граничные условия $x_k > \tau_{\text{опт}}$ или $\tau_{\text{мин}} > \tau_{\text{опт}}$, то $x_k > \tau_{\text{опт}}$ или $\tau_{\text{мин}} > \tau_{\text{опт}}$, то для ограничения амплитуды управления введено звено насыщения с линейным участком единичного наклона в диапазоне $[0, 1]$.

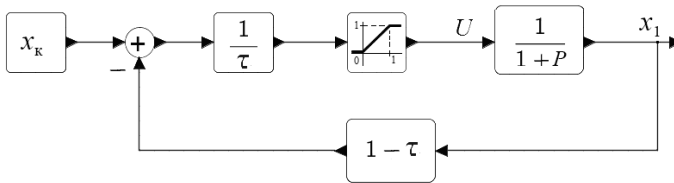


Р и с. 3. Зависимость энергии E от параметра τ в программном движении

F i g. 3. Dependence of the energy E on the parameter τ in the program motion



Р и с. 4. Графики переходных процессов в программном движении
 F i g. 4. Graphs of transients in the program motion



Р и с. 5. Структура позиционной системы управления
 F i g. 5. Structure of the positional control system

Непосредственное применение результатов данной работы можно показать на примере оптимального энергосберегающего управления сушильной камерой, приведенного в работе В. И. Ловчакова [2]. Хотя поведение объекта описывается дифференциальным уравнением второго порядка, для конкретных граничных условий можно построить адекватную модель первого порядка с помощью метода наименьших квадратов по кривой переходного процесса или частотных характеристик. Далее, применяя пошагово методику данной работы, можно в замкнутой устойчивой системе получить квазиоптимальное по энергозатратам

и быстродействию управление, обеспечивающее 10–30 % экономии электроэнергии и в 1,5–2,0 раза большее быстродействие при корректном сравнении с управлением в разомкнутой системе, соответствующим конечному значению выходной координаты.

Обсуждение и заключение

В целом предлагаемый подход к построению оптимальных систем по критериям быстродействия, энергосбережения и точности на основе УОП для нелинейных объектов в расширенном пространстве координат показал свою результативность и эффективность. Квазиоптимальность по энергозатратам и быстродействию в устойчивом

динамическом режиме достигается тем, что в задаче программного движения выполняется минимизация энергии по параметру программного движения, противоречиво влияющему на время переходного процесса и амплитуду управляющего воздействия. Формализованность подхода предполагает его использование в задачах многокритериальной оптимизации и системах автоматизированного проектирования.

В дальнейшем предлагается применять подход к объектам большей размерности с учетом структурно-функциональных особенностей, различных представлений дифференциальных уравнений объекта в нормальной форме или с отражением физической сущности. Не решена задача достижения предель-

ного энергосбережения, получаемого при оптимальном программном управлении, с алгоритмом и структурой устройства определения частных решений и обеспечивающего устойчивость замкнутой стационарной системы.

Результаты работы могут быть использованы при исследовании динамических режимов электроустановок в промышленных и сельскохозяйственных тепловых процессах (жилые и нежилые помещения, теплицы, печи, сушильные камеры, автоклавы); в светотехнических установках; на транспорте в автономных электроприводах; в мехатронных и робототехнических устройствах, например для обеспечения мягкого пуска электроприводов, и в других процессах и установках [19; 20].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доманов В. И., Певчева Е. В. Анализ основных узлов энергосистемы тепличного комбината и способов снижения энергозатрат // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 3. С. 3–10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29115500> (дата обращения: 20.01.2022).
2. Ловчаков В. И. Аппроксимационный подход к синтезу систем регулирования на основе оптимального программного управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 3. С. 225–236. URL: <https://clck.ru/h7ejP> (дата обращения: 20.01.2022).
3. Nikol'skii M. S. Singular Sets of Extremal Controls in Optimal Control Problems // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. 2019. Vol. 304. P. 236–240. doi: <https://doi.org/10.4213/tm3970>
4. Цинцадзе З. Вычисление особого оптимального управления в квазилинейных управляемых системах со смешанными ограничениями // Компьютерные науки и телекоммуникации. 2005. № 2. С. 71–73. URL: http://gesj.internet-academy.org.ge/ru/list_aut_artic_ru.php?b_sec=&list_aut=1248 (дата обращения: 24.01.2022).
5. Gao Z. On Discrete Time Optimal Control: A Closed-Form Solution // Proceeding of the 2004 American Control Conference (30 June – 2 July 2004). Boston, 2004. P. 52–58. URL: https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/acc04/Papers/0009_WeA02.6.pdf (дата обращения: 24.01.2022).
6. A Simple Discrete-Time Tracking Differentiator and Its Application to Speed and Position Detection System for a Maglev Train / H. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2018. Vol. 27, Issue 4. P. 1728–1734. doi: <https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2832139>
7. Филимонов Н. Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 2–10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15510887> (дата обращения: 20.01.2022).
8. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Экспериментальное исследование оптимального управления расходом энергии // АВОК. 2006. № 1. С. 32–36. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3132 (дата обращения: 20.01.2022).
9. Плешивцева Ю. Э., Попов А. В., Дьяконов А. И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2014. № 2.

С. 148–163. URL: <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/article/view/19977/16230> (дата обращения: 25.01.2022).

10. Панферов В. И., Анисимова Е. Ю., Нагорная А. Н. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2007. № 20. С. 3–9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-optimalnom-upravlenii-teplovym-rezhimom-zdaniy> (дата обращения: 20.01.2022).

11. Biyik E., Kahraman A. A Predictive Control Strategy for Optimal Management of Peak Load, Thermal Comfort, Energy Storage and Renewables in Multi-Zone Buildings [Электронный ресурс] // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 25. URL: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1117015634> (дата обращения: 20.01.2022).

12. Хорошавин В. С. Сравнение алгоритмов управления тепловым процессом по быстродействию и на минимум ресурсов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 7. С. 211–216. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43895260> (дата обращения: 20.01.2022).

13. Хорошавин В. С., Грудинин В. С. Синтез программного движения на основе особого оптимального управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 8. С. 395–403. doi: <https://doi.org/10.17587/mau.22.395-403>

14. Дубровин В. С., Никулин В. В. Способ построения управляемых функциональных генераторов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2013. Т. 5, № 2. С. 16–23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897398> (дата обращения: 24.01.2022).

15. Moreau L., Aeyels D. Periodic Output Feedback Stabilization of Single-Input Single-Output Continuous-Time Systems with Odd Relative Degree // Systems & Control Letters. 2004. Vol. 51, Issue 5. P. 395–406. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2003.10.001>

16. Шумафов М. М. Стабилизация линейных систем управления. Проблема назначения полюсов. Обзор // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2019. Т. 6, № 4. С. 564–591. doi: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2019.404>

17. Борковская И. М., Пыжкова О. Н. Задачи управления и стабилизации для гибридных динамических систем // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2018. № 2. С. 5–9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36367417> (дата обращения: 24.01.2022).

18. Колесников В. Л., Бракович А. И., Жук Я. А. Решение многокритериальных задач, оптимальных по Парето // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2014. № 6. С. 128–130. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27707178> (дата обращения: 24.01.2022).

19. Mahmoud M. S., AL-Sunni F. M. Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham : Springer, 2015. 578 p. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16910-1_1 (дата обращения: 20.01.2022).

20. 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. Issue 32. P. 287–302. doi: <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>

Поступила 25.01.2022; одобрена после рецензирования 11.02.2022; принята к публикации 03.03.2022

Об авторах:

Хорошавин Валерий Степанович, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, Researcher ID: G-5298-2018, khoroshavin@vyatsu.ru

Грудинин Виктор Степанович, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, Researcher ID: G-5550-2018, grudinin@vyatsu.ru

Заявленный вклад авторов:

В. С. Хорошавин – постановка задачи и выбор методов решения.

В. С. Грудинин – анализ материалов и моделирование процессов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Domanov V.I., Pevcheva E.V. Analysis of the Greenhouse Complex Main Power Grid Nodes and the Ways to Reduce Energy Consumption. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2017;(3):3–10. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29115500> (accessed 20.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Lovchakov V.I. Approximation Approach to Synthesis of Control Systems Based on Optimal Program Control. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2017;(3):225–236. Available at: <https://clck.ru/h7ejP> (accessed 20.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Nikol'skii M.S. Singular Sets of Extremal Controls in Optimal Control Problems. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2019;304:236–240. doi: <https://doi.org/10.4213/tm3970>
4. Tsintsadze Z. [Computation of Particularly Optimal Control in Quasi-Linear Controlled Systems with Mixed Constraints]. *Kompyuternye nauki i telekommunikatsii*. 2005;(2):71–73. Available at: http://gesj.internet-academy.org.ge/ru/list_aut_artic_ru.php?b_sec=&list_aut=1248 (accessed 24.01.2022). (In Russ.)
5. Gao Z. On Discrete Time Optimal Control: A Closed-Form Solution. In: *Proceeding of the 2004 American Control Conference* (30 June – 2 July 2004). Boston; 2004. p. 52–58. Available at: https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/acc04/Papers/0009_WeA02.6.pdf (accessed 24.01.2022).
6. Zhang H., Xie Y., Xiao G., et al. A Simple Discrete-Time Tracking Differentiator and Its Application to Speed and Position Detection System for a Maglev Train. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2018;27(4):1728–1734. doi: <https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2832139>
7. Filimonov N.B. The Problem of Quality of Control Processes: Change of an Optimizing Paradigm. *Mechatronics, Automation, Management*. 2010;(12):2–10. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15510887> (accessed 20.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. [Experimental Study of Optimal Energy Management]. *Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics*. 2006;(1):32–36. Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3132 (accessed 20.01.2022). (In Russ.)
9. Pleshivtseva Yu.E., Popov A.V., Dyakonov A.I. Two-Dimensional Problem of Optimal with Respect to Typical Quality Criteria Control of through Induction Heating Processes. *Samara State Technical University Bulletin. Technical Sciences Series*. 2014;(2):148–163. Available at: <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/article/view/19977/16230> (accessed 25.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Panferov V.I., Anisimova Ye.Yu., Nagornaya A.N. [On the Optimal Management of the Thermal Regime of Buildings]. *Bulletin of South Ural State University. Power Engineering Series*. 2007;(20):3–9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-optimalnom-upravlenii-teplovym-rezhimom-zdaniy> (accessed 20.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Biyik E., Kahraman A. A Predictive Control Strategy for Optimal Management of Peak Load, Thermal Comfort, Energy Storage and Renewables in Multi-Zone Buildings. *Journal of Building Engineering*. 2019;25. Available at: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1117015634> (accessed 20.01.2022).
12. Khoroshavin V.S. Comparing Optimal Control Algorithms by Time and Minimum Resources Heat. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020;(7):211–216. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43895260> (accessed 20.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Khoroshavin V.S., Grudinin V.S. Synthesis of Programmed Motion Based on Special Optimal Control. *Mechatronics, Automation, Control*. 2021;22(8):395–403. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17587/mau.22.395-403>

14. Dubrovin V.S., Nikulin V.V. [A Way of Constructing Controlled Function Generators]. *High Tech in Earth Space Research*. 2013;5(2):16–23. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897398> (accessed 24.01.2022). (In Russ.)
15. Moreau L., Aeyels D. Periodic Output Feedback Stabilization of Single-Input Single-Output Continuous-Time Systems with Odd Relative Degree. *Systems & Control Letters*. 2004;51(5):395–406. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2003.10.001>
16. Shumafov M.M. Stabilization of Linear Control Systems. Pole Assignment Problem. A Survey. *Vestnik SPbGU. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*. 2019;6(4):564–591. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2019.404>
17. Borkovskaya I.M., Pyzhkova O.N. The Problems of Control and Stabilization for Hybrid Dynamic Systems. *Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika*. 2018;(2):5–9. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36367417> (accessed 24.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Kolesnikov V.L., Brakovich A.I., Zhuk Ya.A. [Solving Pareto-Optimal Multicriteria Problems]. *Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika*. 2014;(6):128–130. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27707178> (accessed 24.01.2022). (In Russ.)
19. Mahmoud M.S., AL-Sunni F.M. Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer; 2015. 578 p. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16910-1_1 (accessed 20.01.2022).
20. Shamshiri R.R., Jones J.W., Thorp K.R., et al. 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. doi: <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>

Submitted 25.01.2022; approved after reviewing 11.02.2022; accepted for publication 03.03.2022

About the authors:

Valeriy S. Khoroshavin, Professor of the Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, Researcher ID: G-5298-2018, khoroshavin@vyatsu.ru

Viktor S. Grudinin, Associate Professor of the Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, Researcher ID: G-5550-2018, grudinin@vyatsu.ru

Contribution of the authors:

V. S. Khoroshavin – problem statement and choice of solution methods.

V. S. Grudinin – material analysis and process modeling.

All authors have read and approved the final manuscript.



«Градиентный» эксперимент в светокультуре


Е. Н. Ракутько, С. А. Ракутько 

Институт агроинженерных и экологических проблем

сельскохозяйственного производства –

филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ

(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

 sergej1964@yandex.ru

Аннотация

Введение. Характерной особенностью большинства экспериментальных научно-исследовательских работ по светокультуре является необходимость варьирования основных параметров светового режима при поддержании других факторов окружающей среды на одном уровне в течение всего эксперимента. Подход к созданию необходимого разнообразия вариантов параметров светового режима за один цикл выращивания растений, рассматриваемый в данной работе, может оказаться приемлемым для сокращения времени проведения экспериментов или для поисковых работ. Цель работы – показать возможность использования градиента освещенности как источника вариации ее величины в экспериментальных работах по светокультуре.

Материалы и методы. Использовался светодиодный светильник с косинусным светораспределением, размещенный над рабочей поверхностью, на которой располагались контейнеры с растениями сладкого перца. В качестве биометрического параметра, характеризующего отклик растения на уровень освещенности, применялась оптическая плотность листьев в различных спектральных диапазонах.

Результаты исследования. На рабочей поверхности наблюдался существенный градиент освещенности. При одинаковом диапазоне освещенностей количество контейнеров с растениями для данной зоны различно и достаточно для проверки статистических гипотез. Величины средних освещенностей по зонам обеспечивали диапазон изменения освещенности в 2,5 раза. Среднеквадратичные отклонения освещенности по зонам составляли 97–163 лк и были практически некоррелированы с величинами средних освещенностей.

Обсуждение и заключение. Разработанная математическая модель градиентного эксперимента в светокультуре позволяет по светотехническим и компоновочным параметрам осветительной установки определить возможное количество повторностей при проведении эксперимента, среднее значение освещенности, среднеквадратичное отклонение, коэффициенты вариации и равномерности в каждой зоне размещения растений. Экспериментально подтверждено, что применение светильника с косинусным светораспределением обеспечивает на горизонтальной поверхности градиент освещенности, средние значения которой в отдельных зонах образуют линейную шкалу. Коэффициенты вариации освещенности в отдельных зонах освещения при установленных в примере параметрах составляли 3,0–11,5 %. При этом коэффициенты вариации оптической плотности листьев растений перца, выращенного в условиях градиентного эксперимента по освещенности, составляли 6,0–11,6 %. Различия средних значений оптической плотности листьев растений в различных зонах градиентного освещения статистически значимы. Это позволяет рекомендовать использование предлагаемого метода для поисковых экспериментов по светокультуре.

© Ракутько Е. Н., Ракутько С. А., 2022



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

Ключевые слова: выращивание растений в теплице, светокультура, осветительная установка, равномерность освещения, градиент, биометрия, фенотипирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ракутько Е. Н., Ракутько С. А. «Градиентный» эксперимент в светокультуре // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 295–312. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.295-312>

Original article

“Gradient” Experiment in Horticulture Lighting

E. N. Rakutko, S. A. Rakutko ✉

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

✉ sergej1964@yandex.ru

Abstract

Introduction. A characteristic feature of most experimental research works on horticulture lighting is the need to vary the main parameters of the light regime while maintaining other environmental factors at the same level throughout the experiment. The approach to creating the requisite variety of variations of light regime parameters in one cycle of plant cultivation, considered in this work, may be acceptable for reducing the time of experiments or for exploratory works. The aim of the work is to show the possibility of using the illuminance gradient as a source of variation in its value in experimental works on horticulture lighting.

Materials and Methods. We used an LED lamp with a cosine light spatial distribution, placed above the work surface, on which containers with sweet pepper plants were placed. The optical density of the leaves in various spectral ranges was used as a biometric parameter characterizing the response of a plant to the level of illumination.

Results. A significant gradient of illumination was observed on the working surface. With the same range of illumination, the number of containers with plants for a given zone is different and is sufficient to test statistical hypotheses. The values of the average illumination by zones provided the range of illumination change by 2.5 times. The standard deviations of illumination by zones were 97–163 lux and were practically no correlated with the values of the average illumination.

Discussion and Conclusion. The developed mathematical model of a gradient experiment in horticulture lighting makes it possible to determine the possible number of replicates during the experiment, the average illumination value, the standard deviation, the coefficients of variation and uniformity in each zone of plant placement, based on the lighting and layout parameters of the lighting installation. It has been experimentally found that the use of a luminaire with a cosine light distribution provides an illumination gradient on a horizontal surface, the average values of which in individual zones form a linear illumination scale. Coefficients of illumination variation in individual lighting zones with the parameters set in the example were 3.0–11.5%. The coefficients of variation of the optical density of the leaves of pepper plants grown under the conditions of the gradient experiment on illumination were 6.0–11.6%. The differences in the mean values of the optical density of plant leaves in different zones of gradient illumination are statistically significant. This allows us to recommend the use of the proposed method for searching experiments on horticulture lighting.

Keywords: greenhouse horticulture, horticulture lighting, lighting installation, illumination uniformity, gradient, biometry, phenotyping

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

For citation: Rakutko E.N., Rakutko S.A. “Gradient” Experiment in Horticulture Lighting. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):295–312. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.295-312>

Введение

Светокультурой называют научные основы и практические приемы выращивания растений в условиях искусственно созданной среды. В результате множества исследований выявлено, что свет является важнейшим экологическим фактором среды обитания растений. Характерной особенностью большинства экспериментальных научно-исследовательских работ по светокультуре является необходимость варьирования при их проведении основных параметров светового режима (интенсивности излучения, его спектрального состава, фотопериода) при поддержании других факторов окружающей среды (полив, температура, влажность и т. д.) на одном уровне в течение всего эксперимента. Такие эксперименты позволяют найти оптимальные условия выращивания растений, что представляет собой не только научный, но и хозяйственный интерес.

Применение искусственного освещения при выращивании растений имеет богатую историю. Началом светокультуры как научной дисциплины, пожалуй, можно считать работу Л. Х. Бейли 1891 г., в которой излагались результаты исследований влияния освещения от дуговых электрических ламп на растения, выращиваемые в теплице [1]. Последующие исследования показали, что растения воспринимают сигналы о световой среде через фоторецепторы и контролирует множество происходящих в них процессов, таких как прорастание, рост под конкурирующими пологам, развитие корней, цветение, адаптируя свою морфологию

и физиологию к меняющимся внешним условиям [2]. Существует взаимодействие между сигнальной функцией света, которая эффективна даже при очень низкой освещенности, и его энергетической функцией в фотосинтезе, поскольку некоторые из реакций, запускаемых фоторецепторами, оказывают непосредственное влияние на эффективность фотосинтеза, углеродный метаболизм, производство биомассы и стрессовые реакции [3]. В контролируемых производственных условиях (теплицы, сити-фермы) свет является ограничивающим фактором для урожайности сельскохозяйственных культур. В условиях постоянного роста населения планеты искусственное освещение становится все более необходимым в структуре сельского хозяйства для обеспечения постоянно растущего спроса на продукты питания [4].

Физиологические, морфологические и анатомические показатели растений зависят от основных параметров светового режима. Листья растений сильно поглощают свет в синем и красном диапазонах, поскольку здесь расположены пики поглощения хлорофиллов (660 и 460 нм). В зеленом диапазоне в основном происходит отражение света¹. Например, для растений перца имеется корреляция между светло-зеленой окраской листьев (в фазе рассады) и светлой окраской плодов в технической спелости [5]. Известно, что высокая интенсивность освещения препятствует удлинению стебля [6]. Для взрослых растений перца уровень освещенности влияет на параметры роста и интенсивность фотосинтеза [7]. В растениях

¹ Taiz L., Zeiger E. *Plant Physiology*. 5th ed. Sunderland : Sinauer Associates, 2010. 781 p.

перца при низком уровне освещенности происходят морфологические изменения для того, чтобы максимизировать использование света. Увеличивается площадь поверхности листьев, межузличные расстояния, листья становятся тоньше, удлиняется стебель. Увеличивается размер хлоропластов и количество хлорофилла в них [8].

Количественное описание компонентов экосистемы и их взаимодействия возможно лишь в строго контролируемых условиях на натурной модели. В естественных условиях из-за меняющихся факторов внешней среды это крайне затруднено. В связи с этим важное значение приобретают вопросы методики проведения экспериментов в светокультуре.

Цель работы – показать возможность использования градиента освещенности как источника вариации ее величины в экспериментальных работах по светокультуре.

Обзор литературы

Понятие градиента физической величины означает, что она принимает различное значение в различных точках пространства (поверхности). Средствами обеспечения такого эффекта для светотехнических величин являются специальные оптические и светотехнические элементы и устройства: градиентные светофильтры, линзы, источники света, светильники². Так, известен градиентный светофильтр, выполненный в виде прозрачной плоской параллельной пластины. В качестве материала светофильтра используется оптическое стекло или пластмасса с радиальным градиентным профилем показателя преломления, который определенным образом зависит от полярного радиуса [9]. Известен градиентный объектив, в котором

выпукло-плоская линза выполнена из материала с определенным распределением показателя преломления [10].

Сравнительный эксперимент в светокультуре – это процедура систематического сбора научных данных в целях проверки правильности гипотезы исследования. Для полного раскрытия потенциала исследования эксперименты по светокультуре должны быть правильно спланированы и организованы [11]. Правильно спроектированный эксперимент прежде всего должен быть рандомизированным с достаточным количеством истинных повторений. Адекватное количество повторений необходимо для оценки ошибки эксперимента, значимости и силы воздействующих факторов. Правильная рандомизация обеспечивает несмещенную оценку наблюдаемых эффектов.

В светокультуре можно выделить отдельные типы исследований: в ростовых камерах, в теплицах, в полевых условиях [12]. Ростовая камера обеспечивает специальные контролируемые условия, в которых исследователь может изучить влияние фактора света на рост растений, выдерживая значения других факторов на заданном уровне в течение всего эксперимента. Основной проблемой в исследованиях в ростовой камере является недостаточное количество повторов или их отсутствие вообще. Поскольку величина исследуемого фактора задается для камеры в целом (а не к отдельному растению), экспериментальной единицей является сама камера. Растения в камере считаются подвыборками и не должны рассматриваться как истинные реплики. Для обеспечения достоверных повторов эксперименты повторяют, используя одну и ту же ростовую камеру несколько раз, назначая случайным

² Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения : Пер. с англ. М. : Мир, 1989. 664 с.

образом уровни исследуемого фактора, что увеличивает сроки и стоимость исследования. Эксперименты в теплице проводятся в контролируемой и управляемой среде, сводя к минимуму почвенные и климатические различия. Здесь экспериментальными единицами являются отдельные растения или их группы, выращиваемые в отдельных горшках или лотках. Несмотря на возможность контроля и управления внутренней средой, ее параметры могут варьироваться внутри всего помещения, создавая градиент параметра, что является нежелательным. Полевые исследования применительно к светокультуре подразумевают наблюдения за рассадой, высаженной в грунт после определенного воздействия в рассадный период. Отдельные однородные полевые участки с более чем с одним растением обычно используются в качестве экспериментальных единиц в исследованиях однолетних и многолетних культур. Для уменьшения экспериментальных ошибок при планировании сравнительных экспериментов настоятельно рекомендуется исключение градиента факторов на опытном поле [13].

При использовании активного эксперимента, как правило, производится его так называемое планирование, то есть выбор сочетания факторов, влияющих на процесс. Эта процедура сокращает необходимое количество опытов и позволяет оценить силу взаимодействия факторов.

Помимо активного, исследователю часто приходится применять пассивный эксперимент, когда уровни факторов в каждом опыте регистрируются, но не задаются. Такая ситуация часто возникает в экологии, поскольку установить уровни факторов окружающей среды затруднено, если не невозможно. Для таких случаев разработан способ анализа растительных сообществ, рассматривающий распределение популяции

по градиенту экологических условий – градиентный анализ.

Рассматривая вопросы влияния основных экологических факторов на растения и растительные сообщества, необходимо затронуть понятие экологического градиента, под которым понимается изменение абиотических факторов от минимального значения к максимальному, что сопряжено с изменением условий существования вида в ареале обитания (климатическая изменчивость).

Градиентный пассивный эксперимент широко применяется в исследованиях по экологии, ботанике, популяционной биологии, при нахождении отклика свойств живых организмов на градиенты как отдельных факторов окружающей среды, так и их совокупности [14]. В частности, он широко и эффективно используется при изучении лесных фитоценозов [15]. Так, исследовали образцы молодых буков европейских (*Fagus sylvatica L.*) и клена платана (*Acer pseudoplatanus L.*) вдоль градиентов доступности света и проанализировали диски стволов для количественной оценки первичного и вторичного роста. Скорость роста бука хорошо объяснялась наличием рассеянного света и онтогенезом. По сравнению с буком доступность света сильнее влияла на вторичный рост стволов платана, и прирост высоты уменьшался с возрастом дерева [16]. Л. Лифлэнг с коллегами обнаружил, что длина черешка и биомасса растений будры плющевидной (*Glechoma hederacea L.*) была больше в условиях светового градиента, нежели чем при равномерном освещении [17]. В аналогичном эксперименте было найдено, что растения *Abutilon theophrasti* при градиентном освещении показали различие признаков на различных уровнях [18]. Это указывает на то, что растения могут по-разному реагировать на разные условия освещения и что

эти разные условия могут по-разному влиять на производительность и качество растений. Другой пример применения градиентного анализа: исследовались закономерности распределения таксономического состава цианобактериально-водорослевых ценозов в шахте пещеры в зависимости от уровня освещенности. В зависимости от глубины погружения в шахту средняя освещенность принимает значения от 33 (и менее) до 85 (и более) люкс. Прямой градиентный анализ выявил снижение биоразнообразия цианобактерий и водорослей по мере продвижения вглубь шахты и уменьшения уровня освещенности [19].

Итак, неравномерность распределения освещенности по плоскости верхушек растений (и внутреннему объему ценоза) в промышленной светокультуре и научных исследованиях является нежелательным обстоятельством, поскольку приводит к неравномерной скорости деления клеток (пролиферации). При выращивании растений в одной группе предполагается, что они должны иметь одинаковые физиологические и морфологические показатели. В результате они вырастут различными, что скажется на качестве самих растений и продукции. Различие отдельных экземпляров растений, выросших в среде с неодинаковыми показателями, приведет к невозможности управлять ими по единому алгоритму. Поэтому в установках для выращивания растений необходимо обеспечивать достаточную равномерность освещения [20].

Для проведения оптимизационных и других экспериментов по светокультуре используют фитотроны (устройства для управляемого выращивания растений в искусственных условиях). Это довольно громоздкие сооружения, имеющие, как правило, значительную стоимость. Они позволяют обеспечить поддержание требуемого параметра

светового режима на протяжении всего эксперимента с большой точностью [21].

Для сокращения времени проведения экспериментов или для поисковых работ может оказаться приемлемым другой подход к созданию необходимого для научно-исследовательской работы разнообразия вариантов параметров светового режима за один цикл выращивания растений. Суть его в использовании различий требуемого параметра в различных областях пространства (поверхности), образуемых за счет компоновочных либо других технических решений.

Такой подход реализован в ряде технических решений. Так, известен многоярусный стеллаж для научно-исследовательских работ с растениями, состоящий из каркаса в виде вертикальных стоек и рам, на которых закреплены полки с размещенными на них под различным углом к горизонту технологическими поверхностями [22]. Применение наклонных поверхностей обеспечивает достаточно плавное изменение уровня освещенности растений. Известен градиентный фитотрон, обеспечивающий освещение всей горизонтальной рабочей поверхности одним источником света [23]. В силу законов фотометрии непосредственно под источником света наблюдается максимальная освещенность, спадающая по мере удаления от проекции источника света на поверхность.

Разработан модуль светового градиента для наблюдения за ростом проростков арабидопсиса (*Arabidopsis thaliana*). Модуль располагается над прямоугольной матрицей, в ячейках которой высажены семена растений. Различные условия освещения (величина освещенности) в группе поперечных ячеек матрицы достигалась применением пленки, прозрачность которой изменялась в продольном направлении

(коэффициент пропускания от 20 до 80 %) [24].

Рассмотрена возможность использования градиентов спектрального состава в сочетании с полуавтоматическим фенотипированием для быстрого определения фенотипических реакций растений на вариации спектра излучения [25]. Плавный спектральный градиент обеспечивался следующим образом. Над рабочей поверхностью, на которой осуществлялось выращивание растений, в линию размещали светильники с различным спектральным составом (соотношением синего и красного излучения в спектре). На одной стороне рабочей поверхности светильники состояли только из синих светодиодов, на противоположной – только из красных. Промежуточные светильники имели соответствующий смешанный спектральный состав. В результате за счет использования такой схемы эксперимента были получены растения, одновременно выращенные под различным спектральным составом.

К градиентному методу по фотопериоду можно отнести биологический метод Горбачева – Дакфельда, базирующийся на накоплении суммарной дозы излучения, падающего на определенные участки поверхности³. Используют шторку, экранирующую поток излучения, которую сдвигают с определенным интервалом по времени. При одинаковой облученности доза пропорциональна времени воздействия. Тогда на различные участки рабочей поверхности передаются различные дозы. Обычно этот метод используют при дозировании УФ-излучения.

Было показано, что равномерность создаваемой освещенности непосредственно связана с энергоэкологичностью процесса облучения растений. Увеличение градиента (неравномерности) освещенности снижает энергоэффективность и экологичность светокультуры [26].

Анализ литературных источников позволяет дать следующее определение. Градиентный эксперимент в светокультуре – вид активного эксперимента, в котором для получения различных уровней исследуемого фактора световой среды используют градиент этого фактора, естественным образом формирующийся в области выращивания растений за счет обеспечения необходимых светотехнических и компоновочных параметров осветительной установки.

Материалы и методы

Эксперимент проводили в октябре – ноябре 2021 г. В качестве объекта исследования использовали растения сладкого перца (*Capsicum Annuum L.*) среднеспелого сорта Калифорнийское чудо. Перец является широко распространенной овощной культурой, содержит большое количество витамина С, Р-активных веществ, каротин, тиамин, никотиновую и фолиевую кислоты, белки и минеральные соли. Поэтому эксперименты по оптимизации технологии его выращивания являются актуальными и востребованными⁴.

Субстрат готовили из одной части грунта для рассады и двух частей универсального питательного грунта. Вносили элементы питания до необходимых количеств. Семена перца высадили 18.10.2021 г. в кассету на глубину около одного сантиметра и поместили

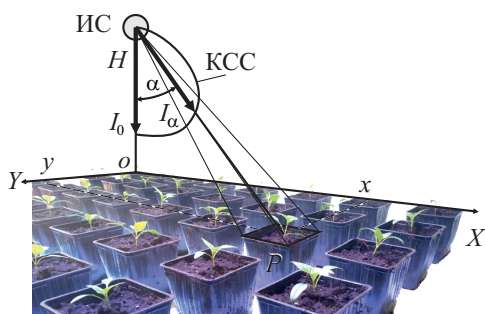
³ Инструкция по применению облучателя ультрафиолетового ОУФд-01 «Солнышко» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.med-magazin.ru/upload/iblock/9bd/9bd9df91de30674a3da692e87b8c77f4.pdf> (дата обращения: 29.12.2021).

⁴ Пышная О. Н., Мамедов М. И., Пивоваров В. Ф. Селекция перца. М., 2012. 247 с.

в пропатор при температуре 27–28 °С. Затем кассету с сеянцами поместили на свет. Массовые всходы наблюдались 25.10.2021 г. Сеянцы пикировали в пластиковые контейнеры с субстратом объемом один литр и выставили под светильник. Всего было выставлено 66 растений. Контейнеры с ними располагались в 6 рядов, по 11 растений в ряду. Известно, что для растений перца уровень освещенности имеет большое значение [27]. Уровень освещенности у каждого контейнера контролировали люксметром «ТКА» с пределом допускаемой основной относительной погрешности измерения $\pm 6\%$. Выращивание завершили 09.11.2021 г., на 15-й день после появления всходов.

Оптические свойства листьев считаются индикаторами комплексной физиологии растений в широком диапазоне условий окружающей среды [28]. В наших предыдущих исследованиях было выявлено, что основное поглощение света листьями перца наблюдается в синем спектральном диапазоне. Также была обнаружена зависимость оптической плотности листьев от уровня освещенности [29]. Поэтому при фенотипировании в качестве одного из биометрических параметров, характеризующих отклик растения на условия выращивания (в данной работе – на уровень освещенности), использовали оптическую плотность листа в j -м спектральном диапазоне D_j ($j = r, g, b$), которую измеряли прибором ДП-1М. Диапазоны при определении оптических плотностей в синем D_b , зеленом D_g и красном D_r диапазонах выставляли светофильтрами с максимумами пропускания 421–467, 511–562 и 607–676 нм соответственно.

Использовали математический аппарат теоретической фотометрии, который применительно к данной задаче изложен в нашей предыдущей работе [30]. Расчетная схема показана на рисунке 1.



Р и с. 1. Расчетная схема для натурной модели градиентного освещения

F i g. 1. Calculation scheme for the full-scale model of gradient lighting

Градиент освещенности создавался на горизонтальной поверхности источником света (ИС), расположенным на высоте H и имеющим кривую силы света (КСС), заданную выражением $I_\alpha = f(\alpha)$.

Растения располагали в узлах прямоугольной координатной сетки, шаг по оси X составлял Δx , шаг по оси Y составлял Δy . В качестве участков поверхности, между которыми определяли градиент освещенности, принят квадрат со стороной b . Положение квадрата в координатной сетке характеризовали его центром – точкой P с координатами x и y соответственно.

Создаваемая освещенность $E(x, y)$ пропорциональна силе света в данном направлении I_α и косинусу угла α между вертикалью и нормалью к поверхности и обратно пропорциональна квадрату высоты светильника H над плоскостью:

$$E(x, y) = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{H^2}. \quad (1)$$

Пусть освещаемая поверхность представляет собой прямоугольник размерами $A \times B$, система координат XOY совпадает с одним из углов прямоугольника.

Для произвольной расчетной точки на поверхности с координатами x

и y расстояние от нее до проекции светильника на плоскость

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (2)$$

Расстояние от светового центра светильника до расчетной точки

$$L = \sqrt{R^2 + H^2}. \quad (3)$$

Косинус угла между вертикалью и направлением на расчетную точку

$$\cos \alpha = \frac{H}{L} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + x^2 + y^2}}. \quad (4)$$

При косинусном светораспределении (излучатель Ламберта, диффузно излучающая плоскость) зависимость силы излучения I_α в произвольном направлении α связана с осевой силой света I_0 выражением

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha. \quad (5)$$

При этом

$$I_0 = \frac{\Phi_{\text{ис}}}{\pi}. \quad (6)$$

Окончательно получаем

$$E(x, y) = \frac{I_0 H^2}{(H^2 + x^2 + y^2)^2}. \quad (7)$$

Коэффициенты равномерности, на всей поверхности и в отдельных зонах освещения, определяются по формуле

$$z = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{мин}}}, \quad (8)$$

где $E_{\text{ср}}$ – среднее значение освещенности; $E_{\text{мин}}$ – минимальное значение освещенности.

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i. \quad (9)$$

В эксперименте высота подвеса светильника составляла $H = 2,40$ м, размер рабочей поверхности $A = 2,0$ м, $B = 1,5$ м, $\Delta x = 0,2$ м, $\Delta y = 0,3$ м. Размер стороны квадратного контейнера $b = 0,1$ м. В качестве источника света использовали регулируемый светодиодный светильник теплого белого излучения. Излучаемый им световой поток составлял $\Phi_{\text{ис}} = 60$ кЛм, светораспределение косинусное. Находили освещенность расчетным методом и сопоставляли со значениями натуральных измерений. Обработку данных вели в электронных таблицах Excel и пакете Statistica.

Результаты исследования

Расчетные значения освещенности соответствовали данным натуральных измерений в пределах точности люксметра. На рабочей поверхности с размещенными на ней контейнерами с растениями наблюдался существенный градиент освещенности. Численно значения освещенности в местах размещения контейнеров показаны в таблице 1. Максимальное для всей поверхности значение освещенности $E_{\text{max}} = 3\,316$ лк наблюдалось непосредственно под светильником, минимальное $E_{\text{min}} = 763$ лк – в точке, максимально удаленной от проекции светильника на рабочую поверхность. Значение коэффициента равномерности для всей рабочей поверхности составляет $z = 2,51$.

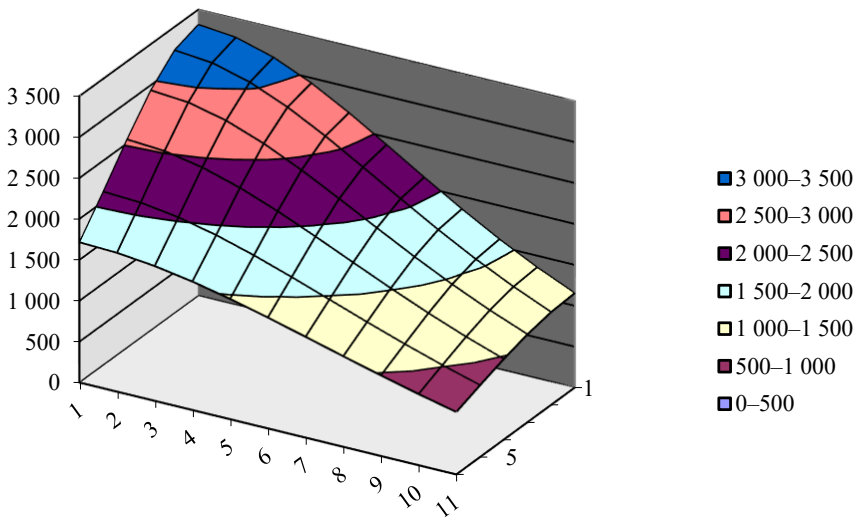
На рисунке 2 показано тело освещенности, создаваемое на рабочей поверхности. Показаны области, образуемые сечением тела освещенности горизонтальными плоскостями (изолуксы). Рисунок дает наглядное представление о плавности изменения величины освещенности по поверхности.

Однако для анализа создаваемого градиента необходима картина освещенности в дискретных точках поверхности (местах размещения контейнеров с растениями, характеризующих их

Таблица 1
 Table 1

 Значения освещенности E_p , лк, в узлах координатной сетки
 Illuminance values E_p , lux, in the nodes of the coordinate grid

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3 316	3 270	3 139	2 937	2 686	2 407	2 122	1 846	1 589	1 358	1 155
2	3 215	3 171	3 046	2 853	2 612	2 345	2 070	1 804	1 555	1 331	1 134
3	2 937	2 899	2 789	2 620	2 407	2 170	1 925	1 685	1 460	1 256	1 074
4	2 549	2 518	2 429	2 291	2 116	1 920	1 715	1 512	1 320	1 143	9 85
5	2 122	2 099	2 031	1 925	1 790	1 636	1 474	1 311	1 155	1 009	877
6	1 715	1 698	1 648	1 570	1 470	1 355	1 232	1 107	985	869	763


 Р и с. 2. Тело освещенности
 F i g. 2. Illumination body

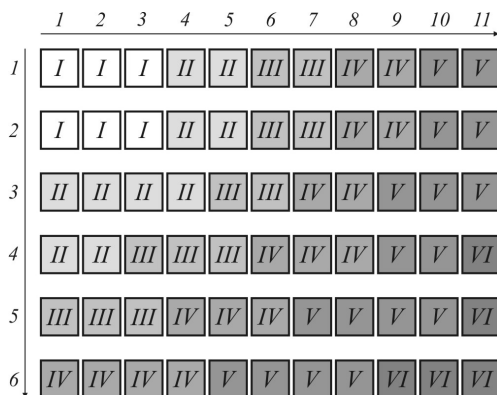
центрами). Группировка контейнеров с растениями по принадлежности к зонам освещенности показана на рисунке 3. Диапазон различий в освещенности, как и на рисунке 2, принят $\Delta E = 500$ лк.

В таблице 2 приведены статистические показатели для освещенности контейнеров по зонам. Первый столбец таблицы – номер зоны. Далее приведены границы диапазона освещенности в зоне, количество контейнеров с растениями n , средние значения освещенности \bar{E} по контейнерам в зоне, среднеквадратичное отклонение σ ,

коэффициент вариации освещенности K_v , коэффициент равномерности z для каждой зоны.

Из дальнейшего анализа исключена шестая зона, поскольку создаваемая в ней освещенность оказалась недостаточной для развития растений.

Как видно из таблицы 2, при одинаковом диапазоне изменения освещенности ΔE количество контейнеров с растениями для каждой зоны различно. Но даже для первой зоны ($n = 6$) это количество достаточно для проверки статистических гипотез.



Р и с. 3. Группировка контейнеров по зонам освещения

F i g. 3. Grouping of containers by lighting zones

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Статистические параметры освещенности контейнеров по зонам
Statistical parameters of container illumination by zone

№	Диапазон, лк / Range, lux	n , шт. / n , pcs.	\bar{E} , лк / \bar{E} , lux	σ , лк / σ , lux	K_v , % / K_v , %	z , отн. ед. / z , relative units
I	3 000–3 500	6	3 193	97	3,0	1,05
II	2 500–3 000	10	2 740	163	5,9	1,09
III	2 000–2 500	12	2 217	148	6,7	1,09
IV	1 500–2 000	16	1 721	136	7,9	1,14
V	1 000–1 500	17	1 256	144	11,5	1,24
VI	500–1 000	5	896	93	10,4	1,17

Величины средних освещенностей \bar{E} по зонам изменяются от 3 193 лк для первой до 1 256 лк для пятой зоны, обеспечивая диапазон изменения освещенности в 2,5 раза.

Среднеквадратичные отклонения освещенности σ по зонам лежат в пределах 97–163 лк и некоррелированы ($R^2 = 0,0179$) с величинами средних освещенностей \bar{E} .

Более наглядной характеристикой разброса освещенности внутри одной зоны является величина коэффициента вариации K_v . Для различных зон эти величины сильно коррелированы ($R^2 = 0,9101$) с величинами средних освещенностей \bar{E} , причем для зон *Electrical technologies and equipment*

с меньшей средней освещенностью K_v принимает большие значения, при этом не превышая значения 11,5 %. Это является вполне допустимым для экспериментов по светокультуре.

Значения коэффициента равномерности z внутри зон варьируются в диапазоне 1,05–1,24 отн. ед. и сильно коррелированы ($R^2 = 0,852$) с величинами средних освещенностей \bar{E} (большие значения z наблюдаются в зонах с меньшей средней освещенностью).

На рисунке 4 показаны средние значения освещенности \bar{E} по зонам и ее разброс $\pm\sigma$. Таким образом, использование градиентного подхода к организации эксперимента предоставляет

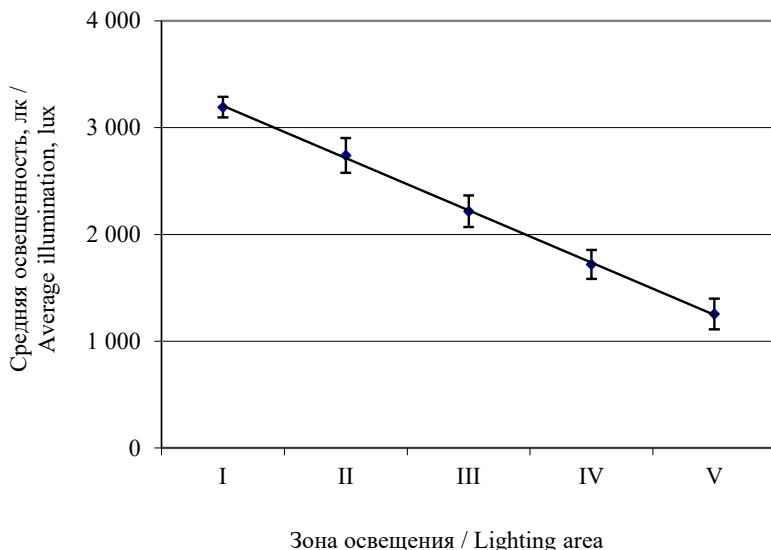
возможность создания равномерной шкалы освещенности.

На рисунке 5 показан вид типичного растения перца, сформировавшегося на момент окончания эксперимента. Размеры первой пары настоящих листьев позволяют произвести измерения их оптической плотности.

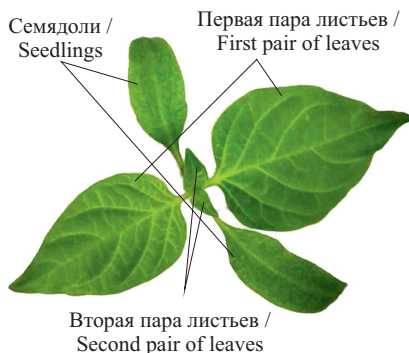
На момент окончания эксперимента растения перца имели пару вполне развитых листьев. Результаты измерения оптической плотности в j -х спектральных диапазонах листьев

растений, выращенных в различных зонах освещения (с I по V), показаны на рисунке 6.

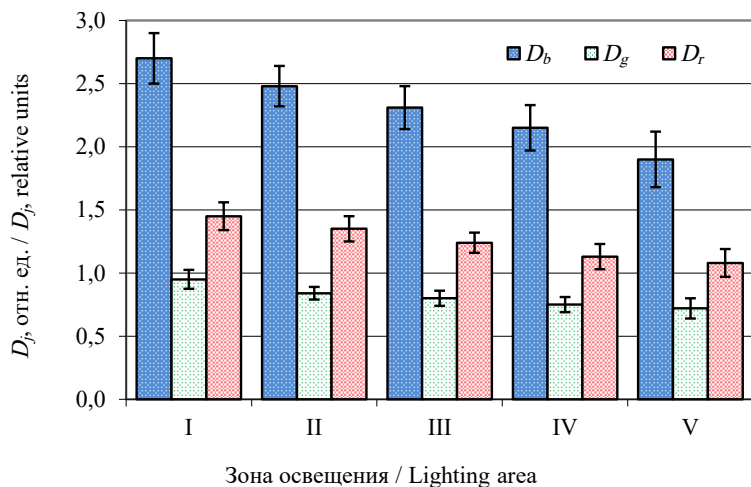
Как и ожидалось, основное поглощение света листьями наблюдается в синем спектральном диапазоне, наименьшее – в зеленом. Оптическая плотность листьев во всех диапазонах падает с уменьшением величины освещенности. Дисперсионный анализ показал статистически значимые различия средних значений освещенности в отдельных зонах ($p < 0,05$).



Р и с. 4. Среднее значение освещенности по зонам
F i g. 4. Average value of illumination by zones



Р и с. 5. Растение перца на момент окончания эксперимента
F i g. 5. Pepper plant at the end of the experiment



Р и с. 6. Оптическая плотность листьев растений, выращенных в различных зонах освещения
 Fig. 6. Optical density of leaves of plants grown in different light zones

Обсуждение и заключение

Анализ научной и технической литературы выявил, что наличие градиента экологического фактора в естественных условиях позволяет организовать пассивный эксперимент по влиянию этого фактора на живые организмы (градиентный анализ). В условиях искусственной среды обитания живых организмов наличие градиента исследуемого фактора обычно является отрицательным явлением, поскольку вносит неопределенность в значение фактора в конкретной точке пространства (поверхности). В светокультуре наличие градиента исследуемого фактора световой среды, естественным образом формирующейся в области выращивания растений за счет обеспечения необходимых светотехнических и компоновочных параметров осветительной установки, позволяет организовать особый вид активного эксперимента – градиентный эксперимент.

Разработанная математическая модель градиентного эксперимента в светокультуре позволяет по светотехническим и компоновочным параметрам осветительной установки определить

возможное количество повторностей (реплик) при проведении эксперимента, среднее значение освещенности, среднее квадратичное отклонение, коэффициенты вариации и равномерности в каждой зоне размещения растений. Экспериментально найдено, что применение светильника с косинусным светораспределением обеспечивает на горизонтальной поверхности градиент освещенности, средние значения которой в отдельных зонах образуют линейную шкалу освещенности. Коэффициенты вариации освещенности в отдельных зонах освещения при установленных в примере параметрах составляли 3,0–11,5 %. При этом коэффициенты вариации оптической плотности листьев растений перца, выращенного в условиях градиентного эксперимента по освещенности, составляли 6,0–11,6 %. Различия средних значений оптической плотности листьев растений в различных зонах градиентного освещения статистически значимы. Это позволяет рекомендовать использование предлагаемого метода для поисковых экспериментов по светокультуре.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Janick J. The Origins of Horticultural Technology and Science // ISHS Acta Horticulturae 759: XXVII International Horticultural Congress – IHC2006: Global Horticulture: Diversity and Harmony, an Introduction to IHC2006. 2007. Vol. 759. P. 41–60. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.759.3>
2. Paik I., Huq E. Plant Photoreceptors: Multi-Functional Sensory Proteins and Their Signaling Networks // Seminars in Cell & Developmental Biology. 2019. Vol. 92. P. 114–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>
3. Photoreceptor Effects on Plant Biomass, Resource Allocation, and Metabolic State / D. Yang [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016. Vol. 113, Issue 27. P. 7667–7672. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1601309113>
4. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture / C. Gómez [et al.] // Journal of the American Society for Horticultural Science. 2019. Vol. 54, Issue 9. P. 1448–1458. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14073-19>
5. Leaf-Color Mutation Induced by Ethyl Methane Sulfonate and Genetic and Physio-Biochemical Characterization of Leaf-Color Mutants in Pepper (*Capsicum Annuum* L.) [Электронный ресурс] / G.-X. Cheng [et al.] // Scientia Horticulturae. 2019. Vol. 257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108709>
6. Rajapakse N. C., Li S. Exclusion of Far Red Light by Photosensitive Greenhouse Films Reduces Height of Vegetable Seedlings // ISHS Acta Horticulturae 631: XXVI International Horticultural Congress: Issues and Advances in Transplant Production and Stand Establishment Research. 2004. Vol. 631. P. 193–199. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.631.25>
7. Effect of Shade on Yield, Quality and Photosynthesis-Related Parameters of Sweet Pepper Plants / J. López-Marín [et al.] // ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. P. 545–552. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.65>
8. Diaz-Perez J. C. Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) Crop as Affected by Shade Level: Micro-environment, Plant Growth, Leaf Gas Exchange, and Leaf Mineral Nutrient Concentration // Journal of the American Society for Horticultural Science. 2013. Vol. 48, Issue 2. P. 175–182. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.2.175>
9. Градиентный компенсационный светофильтр : заявка на патент № 2002125847 Российская Федерация / Верхотуров О. П., Сысоев Е. В., Хахалин А. А. Заявл. 27.09.2002 ; опубл. 27.03.2004. 1 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2002125847&TypeFile=html (дата обращения: 29.12.2021).
10. Градиентный однолинзовый микрообъектив : патент 1758622 СССР / Казаков В. И., Ровенская Т. С., Точкина Г. А. № 4840867 ; заявл. 29.05.1990 ; опубл. 30.08.1992. 6 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=1758622&TypeFile=html (дата обращения: 10.07.2021).
11. Piepho H. P., Buchse A., Emrich K. A Hitchhiker’s Guide to Mixed Models for Randomized Experiments // Journal of Agronomy and Crop Science. 2003. Vol. 189, Issue 5. P. 310–322. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00049.x>
12. Fernandez G. C. J. Design and Analysis of Commonly Used Comparative Horticultural Experiments // Journal of the American Society for Horticultural Science. 2007. Vol. 42, Issue 5. P. 1052–1069. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1052>
13. Chi Y., Wang E., Wang J. Identifying the Anthropogenic Influence on the Spatial Distribution of Plant Diversity in an Estuarine Island through Multiple Gradients [Электронный ресурс] // Global Ecology and Conservation. 2020. Vol. 21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00833>
14. Garnier E., Navas M.-L. A Trait-Based Approach to Comparative Functional Plant Ecology: Concepts, Methods and Applications for Agroecology. A Review // Agronomy for Sustainable Development. 2012. Vol. 32. P. 365–399. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y>
15. Скляр В. Г. Использование градиентного анализа при изучении естественного возобновления лесов // Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки. 2015. № 2. С. 196–207. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25038598> (дата обращения: 10.02.2022).

16. Growth and Resource Allocation of Juvenile European Beech and Sycamore Maple Along Light Availability Gradients in Uneven-Aged Forests [Электронный ресурс] / M. Brüllhardt [et al.] // Forest Ecology and Management. 2020. Vol. 474. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118314>
17. Leeftang L., During H. J., Werger M. J. A. The Role of Petioles in Light Acquisition by Hydrocotyle Vulgaris L. in a Vertical Light Gradient // Oecologia. 1998. Vol. 117. P. 235–238. doi: <https://doi.org/10.1007/s004420050653>
18. Wang S., Zhou D.-W. Architectural Plasticity in Response to Population Density in Abutilon Theophrasti (Malvaceae) // Ecological Research. 2022. Vol. 37, Issue 2. P. 228–239. doi: <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12284>
19. Гайнутдинов И. А., Абдуллин Ш. Р. Градиентный анализ влияния освещенности на состав цианобактериально-водорослевых ценозов в привходовой шахте пещеры Кутук-Сумган (Республика Башкортостан) // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2016. Т. 21, № 2. С. 11–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26082250> (дата обращения: 10.02.2022).
20. Xu Y. Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth // ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. 2016. Vol. 1134. P. 445–452. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56>
21. Семенова Н. А., Гришин А. А., Дорохов А. А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур // Вестник НГИЭИ. 2020. № 1. С. 5–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41863682> (дата обращения: 10.02.2022).
22. Многоярусный стеллаж для научно-исследовательских работ : патент 2537923 Российская Федерация / Петренко Э. Э. [и др.]. № 2013122320/13 ; заявл. 14.05.2013 ; опубл. 10.01.2015. 5 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2537923&TypeFile=html (дата обращения: 20.12.2021).
23. Градиентный фитотрон : патент 207773 Российская Федерация / Мартиросян Ю. Ц. [и др.]. № 2020137207 ; заявл. 12.11.2020 ; опубл. 16.11.2021. 2 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=207773&TypeFile=html (дата обращения: 20.12.2021).
24. Park Y. H., Park J. K. Light Gradient-Based Screening of Arabidopsis Thaliana on a 384-Well Type Plant Array Chip [Электронный ресурс] // Micromachines. 2020. Vol. 11, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.3390/mi11020191>
25. LED Light Gradient as a Screening Tool for Light Quality Responses in Model Plant Species [Электронный ресурс] / P. Lejeune [et al.] // BioRxiv. 2020. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.10.08.320002>
26. Ракутько Е. Н., Ракутько С. А., Васкин А. В. Влияние компоновочных параметров облучательной установки на энергоэкологичность светокультуры // Агроэкоинженерия. 2021. № 3. С. 33–51. doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-33-50>
27. Regulation of Nitric Oxide to Capsicum under Lower Light Intensities / L. Li [et al.] // South African Journal of Botany. 2020. Vol. 132. P. 268–276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.05.020>
28. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge : Cambridge University Press, 2019. 556 p. doi: <https://doi.org/10.1017/9781108686457>
29. Цифровой двойник растения в светокультуре на примере перца (Capsicum Annuum L.) в рассадный период / Е. Н. Ракутько [и др.] // Агроэкоинженерия. 2021. № 3. С. 13–33. doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-13-33>
30. Ракутько С. А., Ракутько Е. Н. Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 470–486. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486>

Поступила 14.03.2022; одобрена после рецензирования 20.04.2022; принята к публикации 06.05.2022

Об авторах:

Ракутько Елена Николаевна, научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала Федерального

научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, Researcher ID: AAW-6856-2021, elena.rakutko@mail.ru

Ракутько Сергей Анатольевич, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией энергоэкологии светокультуры Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Researcher ID: B-2745-2014, Scopus ID: 26040971100, sergej1964@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. Н. Ракутько – анализ научных источников, математическое моделирование, написание статьи.

С. А. Ракутько – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи, написание статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Janick J. The Origins of Horticultural Technology and Science. In: ISHS Acta Horticulturae 759: XXVII International Horticultural Congress – IHC2006: Global Horticulture: Diversity and Harmony, an Introduction to IHC2006. 2007. Vol. 759. p. 41–60. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.759.3>

2. Paik I., Huq E. Plant Photoreceptors: Multi-Functional Sensory Proteins and Their Signaling Networks. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2019;92:114–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>

3. Yang D., Seaton D.D., Kraemer J., Halliday K.J. Photoreceptor Effects on Plant Biomass, Resource Allocation, and Metabolic State. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016;113(27):7667–7672. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1601309113>

4. Gómez C., Currey C.J., Dickson R.W., et al. Controlled Environment Food Production for Urban Agriculture. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2019;54(9):1448–1458. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14073-19>

5. Cheng G.-X., Zhang R.-X., Liu Sh., et al. Leaf-Color Mutation Induced by Ethyl Methane Sulfonate and Genetic and Physio-Biochemical Characterization of Leaf-Color Mutants in Pepper (*Capsicum Annuum* L.). *Scientia Horticulturae*. 2019;257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2019.108709>

6. Rajapakse N.C., Li S. Exclusion of Far Red Light by Photosensitive Greenhouse Films Reduces Height of Vegetable Seedlings. In: ISHS Acta Horticulturae 631: XXVI International Horticultural Congress: Issues and Advances in Transplant Production and Stand Establishment Research. 2004. Vol. 631. p. 193–199. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.631.25>

7. López-Marin J., Gálvez A., González A., et al. Effect of Shade on Yield, Quality and Photosynthesis-Related Parameters of Sweet Pepper Plants. In: ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. p. 545–552. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.65>

8. Diaz-Perez J.C. Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) Crop as Affected by Shade Level: Microenvironment, Plant Growth, Leaf Gas Exchange, and Leaf Mineral Nutrient Concentration. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2013;48(2):175–182. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.2.175>

9. Verkhoturov O.P., Sysoev Ye.V., Khakhalin A.A. [Gradient Compensating Filter]. Patent Application no. 2,002,125,847 Russian Federation. 2004 March 27. 1 p. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2002125847&TypeFile=html (accessed 29.12.2021). (In Russ.)

10. Kazakov V.I., Rovenskaya T.S., Tochkina G.A. [Gradient Single Lens Micro Lens]. Patent 1,758,622 USSR. 1992 August 30. 6 p. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=1758622&TypeFile=html (accessed 10.07.2021). (In Russ.)
11. Piepho H.P., Buchse A., Emrich K. A Hitchhiker's Guide to Mixed Models for Randomized Experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2003;189(5):310–322. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00049.x>
12. Fernandez G.C.J. Design and Analysis of Commonly Used Comparative Horticultural Experiments. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2007;42(5):1052–1069. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1052>
13. Chi Y., Wang E., Wang J. Identifying the Anthropogenic Influence on the Spatial Distribution of Plant Diversity in an Estuarine Island through Multiple Gradients. *Global Ecology and Conservation*. 2020;21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00833>
14. Garnier E., Navas M.-L. A Trait-Based Approach to Comparative Functional Plant Ecology: Concepts, Methods and Applications for Agroecology. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2012;32:365–399. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y>
15. Skliar V.G. Using Gradient Analysis in the Study Natural Forest Regrowth. *Visnik Zaporizkogo natsionalnogo universitetu. Biologichni nauki*. 2015;(2):196–207. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25038598> (accessed 10.02.2022). (In Ukr., abstract in Eng.)
16. Brüllhardt M., Rotach P., Bigler C., et al. Growth and Resource Allocation of Juvenile European Beech and Sycamore Maple Along Light Availability Gradients in Uneven-Aged Forests. *Forest Ecology and Management*. 2020;474. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118314>
17. Leeftang L., During H.J., Werger M.J.A. The Role of Petioles in Light Acquisition by *Hydrocotyle Vulgaris* L. in a Vertical Light Gradient. *Oecologia*. 1998;117:235–238. doi: <https://doi.org/10.1007/s004420050653>
18. Wang S., Zhou D.-W. Architectural Plasticity in Response to Population Density in *Abutilon Theophrasti* (Malvaceae). *Ecological Research*. 2022;37(2):228–239. doi: <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12284>
19. Gaynutdinov I.A., Abdullin Sh.R. Gradient Analysis of the Light Influence on the Composition of Cyanobacteria and Algae Coenoses at the Entrance Shaft of the Kutuk-Sumgan Cave (Republic of Bashkortostan). *Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2016;21(2):11–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26082250> (accessed 10.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Xu Y. Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth. In: ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. 2016. Vol. 1134. p. 445–452. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56>
21. Semenova N.A., Grishin A.A., Dorokhov A.A. Analytical Review of Climatic Chambers for Vegetable Crops Growing. *Bulletin NGII*. 2020;(1):5–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41863682> (accessed 10.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Petrenko E.E., Stepanchuk G.V., Klyuchka Ye.P., Ponomareva N.Ye. [Multi-Level Shelving for Research Work]. Patent 2,537,923 Russian Federation. 2015 January 10. 5 p. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2537923&TypeFile=html (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
23. Martirosyan Yu.T., Martirosyan L.Yu., Martirosyan D.Yu., Akopyan V.B. [Gradient Phytotron]. Patent 207,773 Russian Federation. 2021 November 16. 2 p. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=207773&TypeFile=html (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
24. Park Y.H., Park J.K. Light Gradient-Based Screening of *Arabidopsis Thaliana* on a 384-Well Type Plant Array Chip. *Micromachines*. 2020;11(2). doi: <https://doi.org/10.3390/mi11020191>
25. Lejeune P., Fratamico A., Bouché F., et al. LED Light Gradient as a Screening Tool for Light Quality Responses in Model Plant Species. *BioRxiv*. 2020. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.10.08.320002>
26. Rakutko Ye.N., Rakutko S.A., Vaskin A.V. Effect of Lighting Fixtures Spatial Arrangement on Energy and Ecological Performance of Greenhouse Horticulture. *Agroekoinzheneriya*. 2021;(3):33–51. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-33-50>

27. Li L., Tian S.L., Jiang J., Wang Y. Regulation of Nitric Oxide to Capsicum under Lower Light Intensities. *South African Journal of Botany*. 2020;132:268–276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.05.020>
28. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge: Cambridge University Press; 2019. 556 p. doi: <https://doi.org/10.1017/9781108686457>
29. Rakutko Ye.N., Rakutko S.A., Mishanov A.P., Markova A.Ye. Digital Twin of a Plant in Greenhouse Horticulture: Case Study of Pepper (*Capsicum Annuum* L.) in Transplant Period. *Agroekoinzheneriya*. 2021;(3):13–33. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-13-33>
30. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Assessment of Lighting Uniformity as a Factor of Energy Efficiency in Greenhouse Horticulture. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(3):470–486. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486>

Submitted 14.03.2022; approved after reviewing 20.04.2022; accepted for publication 06.05.2022

About the authors:

Elena N. Rakutko, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, Researcher ID: [AAW-6856-2021](https://orcid.org/AAW-6856-2021), elena.rakutko@mail.ru

Sergey A. Rakutko, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Energy Ecology of Light Culture, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Researcher ID: [B-2745-2014](https://orcid.org/B-2745-2014), Scopus ID: [26040971100](https://orcid.org/26040971100), sergej1964@yandex.ru

Contribution of the authors:

E. N. Rakutko – analysis of scientific sources, mathematical modeling, writing the article.

S. A. Rakutko – scientific guidance, formulation of the basic research concept and structure of the article, writing the article.

All authors have read and approved the final manuscript.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ / FOOD SYSTEMS

УДК 664.6:664.230,

doi: 10.15507/2658-4123.032.202202.313-323

Original article



The Influence of Gluten-Free Flour on Bakery Dough Quality

A. A. Merker , E. N. Reva, V. A. Serdyuk

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

 anastasia.merker@mail.ru

Abstract

Introduction. One of the main objectives of the food industry is the development of bakery technology for dietary and functional foods. The article gives a complete description of specialized food products. The purpose of this work is to investigate the influence of amaranth and linseed flours on the quality of the gluten-free bakery products. During the study, there was determined the best proportion of gluten-free mixture ingredients for producing a quality product.

Materials and Methods. In the course of the study, there were chosen different formulas of mixtures with the use of amaranth and linseed flours produced by “S.Pudov” company, corn starch by “Trapeza” company, and other ingredients such as yeast, drinking-water, salt and sugar.

Results. To the formula under development there were added 17 grams of corn starch. At the same time, an increase in the gas retention capacity of the dough was noted. The starch served as the best binding component when mixing water with flour.

Discussion and Conclusion. On the basis of the tests performed, data on pH of the dough medium with different proportions of amaranth and linseed flours were obtained. The most acidic medium is in the dough in which the amount of linseed flour is more than the amount of amaranth one. The conducted studies allow assuming that this is caused by the high acidity of linseed flour.

Keywords: gluten-free bread, amaranth flour, linseed flour, gluten-free mixture, recipe

Acknowledgments: We express gratitude to the scientific and pedagogical team of the Chair of Food Engineering and Technology of Don State Technical University, especially to I. A. Khoziaev and T. I. Tupolskikh. We also thank the reviewers of this article.

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

For citation: Merker A.A., Reva E.N., Serdyuk V.A. The Influence of Gluten-Free Flour on Bakery Dough Quality. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):313–323. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.313-323>

© Merker A. A., Reva E. N., Serdyuk V. A., 2022

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

Влияние безглютеновой муки на качественные показатели теста при замесе хлебобулочного изделия

А. А. Меркер , Е. Н. Рева, В. А. Сердюк

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

 anastasia.merker@mail.ru

Аннотация

Введение. Одной из основных целей пищевой промышленности является разработка технологии хлебобулочных изделий для диетического и функционального питания. В статье приведена полная характеристика специализированных пищевых продуктов. Целью данной работы является исследование влияния амарантовой и льняной муки на качественные показатели теста для приготовления безглютеновых хлебобулочных изделий. Согласно поставленным задачам определено наилучшее соотношение ингредиентов безглютеновой смеси для получения качественного продукта.

Материалы и методы. В ходе работы были подобраны различные рецептуры смесей с применением амарантовой и льняной муки фирмы «С.Пудовъ», кукурузного крахмала производителя «Трапеза», а также других ингредиентов: дрожжи, вода питьевая, соль пищевая и сахар.

Результаты исследования. В разрабатываемую рецептуру был добавлен кукурузный крахмал в количестве 17 г. При этом было отмечено увеличение газоудерживающей способности теста. Крахмал служил лучшим связующим компонентом при соединении воды с мукой.

Обсуждение и заключение. В результате исследования получены данные о pH среде теста с различным соотношением амарантовой и льняной муки. Самая кислая среда в том виде теста, в котором количество льняной муки преобладает над содержанием амарантовой. На основе этих исследований можно допустить, что это связано с высокой кислотностью льняной муки.

Ключевые слова: безглютеновый хлеб, амарантовая мука, льняная мука, безглютеновая смесь, рецепт

Благодарности: Выражаем благодарность научно-педагогическому коллективу кафедры техники и технологий пищевых производств Донского государственного технического университета, особенно И. А. Хозяеву, Т. И. Тупольских. Мы также благодарим рецензентов данной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Меркер А. А., Рева Е. Н., Сердюк В. А. Влияние безглютеновой муки на качественные показатели теста при замесе хлебобулочного изделия // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 313–323. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.313-323>

Introduction

Gluten type of vegetable protein found in wheat, barley, rye. Gluten plays an important role in the formation of important elastic bonding when mixing dough. In the absence of gluten in flour products there are such problems as lack of

swelling (gas retention capacity), elasticity, openness, etc. [1–4]. But gluten-free bakery products are gaining popularity. This increase in the popularity of gluten-free products is caused by an increase in the number of people suffering from gluten intolerance. The only treatment for this

disease is a strict gluten-free diet. In addition, the problem of healthy eating today is relevant in view of the increase in allergic and genetic diseases, as well as of the serious environmental situation in the world.

One of the main goals of the food industry is the development of specialized bakery products for dietary and functional nutrition. The main types of flour used for the production of such bakery products are following types of flour: buckwheat, amaranth, rice, linen, maize, hemp, etc [5–7].

Today, the Russian market of gluten-free products is represented by a rather small assortment, because most production depends directly on imports. Despite the fact that according to various data, 0.5–1.0% of the population in the Russian Federation has gluten intolerance, the question of increasing the baking production is very important. In order to solve this problem, it is necessary to increase the production of “useful” products and improve their quality through using new, improved approaches and production technologies [8].

For developing new technologies and formulas of gluten-free bakery products, Russia has been gained considerable experience. Every year, more and more nutritionists choose to research raw materials for specialized foods. The purpose of this work is to investigate the impact of amaranth and linseed flour on the quality of the gluten-free bakery products.

The research objectives of this paper are as follows:

- to conduct physico-chemical analysis of amaranth and linseed flour;
- to develop the optimal formulas for the addition of amaranth and linseed flour;
- to develop a pilot plan and methodology of the experiment;
- to analyze the formulas received;
- to develop the optimum formula for producing gluten-free bread using amaranth and linseed flour, and study the rheological characteristics of the dough depending on the quantitative content.

Literature review

The scientists have made an indispensable contribution to the development of gluten-free bakery products are L. N. Kazanskaya, N. D. Sinyavskaya, V. N. Krasilnikov, N. V. Barsukova, N. A. Leontieva, T. B. Tsyganova, T. I. Schneider, D. V. Schneider, V. S. Mehtiyev etc.

But the question of enriching gluten-free bakery products through using non-conventional raw materials needs further study.

In the article by T. V. Orlova and P. I. Kudinov, there are presented developed formulas and technologies of producing gluten-free bakery products with the use of gluten-free flour mixtures. The formulas of these flour mixtures include rice, quinoa and buckwheat flours. The article also analysed production regimes and bakery product formulas [1; 9].

In the work by E. V. Nelubina and E. N. Urbancik there are considered technologies of making bread based on gluten-free pea raw materials. The research has resulted in producing a new product of high energy and biological value [2; 10]. P. Zh. Anashkina, E. V. Moskvicheva etc. in their scientific paper investigated gluten-free flour types for making bakery products. The work evaluated the organoleptic, physico-chemical and functional-technological properties of the flours under studying to determine the proportion of the flour mixture for producing a quality bakery product [3; 11].

L. V. Zaitseva and T. A. Yudina in their scientific paper studied modern approaches to the formulas of gluten-free products and developed the formulas for making gluten-free bakery products enriched with proteins and food fibers. For this purpose, unconventional flour such as chia seed flour and lupine flour were used. Thus, the resulting product expanded the assortment of gluten-free products with an increase in their non-dietic and dietary orientation, due to the high fiber content dietary fibers [4; 12].

In their article, S. Dracula, D. Novotni described a study aimed at determining the

influence of partial substitution of flour coarse grinding with yellow pea flour on phenols and the antioxidant capacity of gluten-free sour and bread. The research has shown the value of using fermentation in a carefully proportioned sour when adding pea flour to gluten-free bread, which allows for a high antioxidant potential [13].

S. A. Urubkov and S. S. Khovanskaya in their article considered a limited range of functional products for children with limited nutrition. It was concluded that it is necessary to expand the production of specialized gluten-free products. The authors also considered the possibility of using dry gluten-free mixtures for children, where the main component is rice and amaranth flour with the addition of fruit, vegetable and berry raw materials [8; 14].

All of these sources reveal most of the problems associated with producing foods for particular nutritional uses.

Materials and Methods

In the course of the study, there were chosen different formulas of mixtures with the use of amaranth and linseed flours produced by “S.Pudov” company, corn starch by “Trapeza” company, and other ingredients such as yeast, drinking-water, salt and sugar¹ [15; 16].

Bread formula is presented in table 1.

Table 1
Gluten-free bread formula per 100 g

Name of ingredient	Model no. 1	Model no. 2	Model no. 3
Amaranth flour, g	60.0	50.0	40.0
Linseed flour, g	40.0	50.0	60.0
Starch, g	17.0	17.0	17.0
Yeast, g	1.5	1.5	1.5
Salt, g	0.2	0.2	0.2
Sugar, g	0.5	0.5	0.5
Water, ml	150.0	137.0	110.0

The formulas differed in the quantity of several flour types and the amount of water consumed, while other ingredients remained in the same proportion [17–21]. Based on the formula developed, three dough samples were mixed with a bread maker as shown in Figure 1.



Fig. 1. Bread maker

The ready dough was tested for a number of important indicators such as: the dough acidity, pH, the value of the critical shear stress and the organoleptic estimation [4; 20–22]. All researches were carried out in the laboratory of Biochemical and Spectral Analysis of Food Products of the Chair of Food Engineering and Technology of Don State Technical University.

Determination of the dough acidity

During the dough maturation, a number of organic acids are accumulated in it: lactic, acetic, propionic and others. All they have a characteristic odor affecting the taste and smell of the bakery products. The flour acidity has a significant influence on the quality of the finished bakery products. The level of acidity of flour depends on the variety and duration

¹ Kutz A.A., Shirokova N.V. [Development of Bakery Products Technology Using Buckwheat and Spelt Processing Products]. In: New Approaches to the Development of Technologies for the Production and Processing of Agricultural Products. Volgograd; 2018. p. 327–329. (In Russ.)

of storage [23–26]. High flour acidity results in high initial dough acidity and rapid acid accumulation during fermentation. The acidity level was determined according to GOST 5670-96². Preparation of the mixture: batch of test sample 5 g was dissolved in 50 ml of distilled water; 3 drops of phenolphthalein were added to the beaten-up flour and water, and was titrated with 0.1N NaOH until a light pink color was formed that did not disappear within 30 seconds. Figure 2 shows the coloring of the mixture.



Fig. 2. Titration of the mixture

Acidity is one of the most important indicators not only of readiness but also of quality, since the composition and quantity of acids have a particular influence on the most important processes in mixing the bread dough, and in consequence, influence the organoleptic characteristics of the finished product [27–30].

Determination of pH

Determination of pH is performed with a pH-meter “Expert pH”, the device is shown in Figure 3, intended to measure

pH activity and the mass concentration of OH and H ions in the test samples.

Measurement error is 0.001. Sample preparation: 5 g of sample was put in a measuring bulb and dissolved in 20 ml of distilled water, and then pH was measured with a measuring transducer.

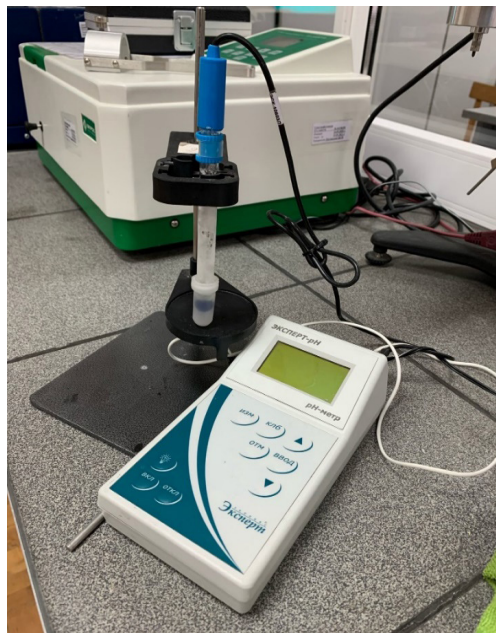


Fig. 3. PH-meter “Expert pH”

A large quantity of compounds or elements in flour helps to maintain a suitable acid-alkali balance for a particular type of flour. It allows controlling and fermentation processes [31–34].

Determination of the critical shear stress

Critical shear stress means the force necessary to deform a product. The consistency of the dough is determined with a device called a conical plastometer [35–38]. The method of determination is shown in Figure 4.

² GOST 5670-96. [Bread, Rolls and Buns. Methods for Determination of Acidity]. Moscow; 1997. (In Russ.)



Fig. 4. Unit for determination the shear stress

The test mass is placed on the surface of the unit, the top of the cone comes into contact with the mass surface. The depth of the cone immersion is determined with a ruler [39–41]. The depth of immersion of the material is fixed in the results of the measurements, and then the critical shear stress is determined according to formula:

$$\tau_0 = K_a \times \frac{P_r}{h_{\max}^2},$$

P_r – cone load; K_a – cone constant, depending on the angle at the vertex ($K = 2$); h_{\max}^2 – immersion value in an investigated material.

Results

In the development of the recipe, cornstarch was added as it increases the test’s gas retention capacity, as well as removing moisture and is a binding component when water and flour are combined. The

results of the shear stress determination are presented in Table 2.

Table 2

Research results		
Parameter	Shear stress	pH
Model no. 1	1.00	5.00
Model no. 2	1.00	5.00
Model no. 3	1.00	5.00

Based on the results obtained, we can assume that as the quantity of linseed flour increases, the value of shear stress increases. This suggests that the high content of linseed flour worsens the rheological properties of the dough, such as elasticity.

One of the most important indicators of the quality of finished products is acidity. It is a measure of total acidity as a proxy; titled acidity is the sum of free protons and non-dissociated acids in solution. Quantitative indicators of acidity are presented in Figure 5.

Bakery products with a high content of linseed flour are more acidic and of a lower specific volume. It was noted that the acidity of sample 3 is higher than that of the rest of the samples, which is related to the fact that linseed flour has a high content of organic acids: acetic, apple and lemon.

The main difference between pH and titrated acidity is that pH measures the concentration of free protons in a solution, while titrated acidity measures the sum of free protons and non-dissociated acids in a solution [42–44]. The research results are presented in Table 2

The results of the studies show that in sample 1 with a high content of amaranth flour, the pH is less acidic than in sample 3 with a predominantly linseed flour.

Discussion and Conclusion

When comparing the two types of flour, amaranth and linseed, it turns out that the sample with linseed flour has a fairly high content of protein and food fibers, while amaranth flour is high carbohydrate and has a low content of proteins and fats.

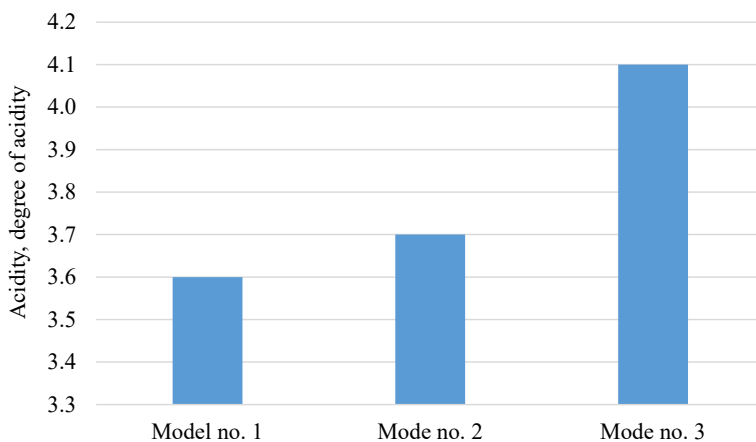


Fig. 5. Acidity of different types of dough

In the course of the research, optimal formulas of mixtures with the use of amaranth and linseed flours were selected. As a result of the research, the dependence of the quantitative water content on the flour was revealed. In sample no. 3, where the content of amaranth and linseed flours was 40 and 60 g, respectively, the total amount of water used for dough kneading was 1.5 times more than for sample no. 1, where the content of amaranth and linseed flours was 60 and 40 g, respectively. The sample with high amaranth flour content (sample 1) required the most water to kneading the dough of homogeneous consistency. It can be concluded that amaranth flour has a high water-absorption capacity.

With regard to rheological properties, there is a correlation: the depth of immersion is decreasing with increasing the shear stress value. Acidity has a great influence on the quality of finished bakery products. The experience shows that bread with a high content of linseed flour has an acidity index of 4.1, indicating that this type of

dough has acid medium. Bakery products with increased acidity are more acidic at the end of the baking process.

On the basis of the tests carried out, there were obtained the data on pH of dough with different proportions of amaranth and linseed flours. The most acidic type of dough is one, in which the amount of linseed flour is more than of amaranth flour. Based on these studies, it can be assumed that this is caused by high acidity of linseed flour.

Thus, the research showed that the optimal content of amaranth and linseed flour when kneading dough is 40 and 60% respectively. The high nutritional value of linseed flour and the high content of fiber, which improves digestion, leads to faster saturation and releasing of toxins, while substances contained in amaranth flour are enzymes, which normalize the acidity of the gastric juice and enhance secretory function of the stomach and intestines, provide a good end product with high biological value and significant nutrient content.

REFERENCES

1. Orlova T.V., Kudinov P.I. [Development of the Recipe and Production Technology for Bread on the Basis of Gluten-Free Flour Mixtures]. *Polzunovskiy vestnik*. 2020;(2):50–57. Available at: <https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest/issue/view/7/7> (accessed 20.01.2022). (In Russ.)

2. Nialiubina A.V., Ourbantchik A.M., Kaminskaya V.S., et al. Elaboration of Bread-Baking Technology Based on Gluten-Free Fermented Pea Product. *Food Industry*. 2019;(4):71–72. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10035>
3. Anashkina P.Zh., Moskvicheva E.V., Timoshenkova I.A., Moskvichev A.S. A Study of Gluten Free Flour Types for the Production of Bakery Products. *International Research Journal*. 2021;(1):98–104. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.014>
4. Zaytseva L.V., Yudina T.A., Ruban N.V., et al. Modern Approaches to the Development of Gluten-Free Bakery Formulations. *Problems of Nutrition*. 2020;89(1):77–85. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10009>
5. Zharkova I.M., Samokhvalov A.A., Gustinovich V.G., et al. Review of Bakery Products for Gluten Free and Herodietetic Nutrition. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2019;81(1):213–217. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-213-217>
6. Popov V.G., Hajrullina N.G., Sadykova H.N. Trends in the Use of Gluten-Free Flours in the Production of Functional Products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021;83(1):121–128. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-121-128>
7. Anashkina P.Zh., Moskvicheva E.V., Timoshenkova I.A. Using Non-Traditional Types of Vegetable Raw Materials in Bakery Products. *International Research Journal*. 2020;(8):105–110. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.015>
8. Urubkov S., Khovanskaya S., Smirnov S. Prospects for Using Amaranth and Native Buckwheat in Dry Gluten-Free Mixes for Children with Gluten Intolerance. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(2):232–241. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-232-241>
9. Shchekoldina T.V. [Mixing Technology of Gluten-Free Flour Mixtures Based on Quinoa]. *Polzunovskiy vestnik*. 2019;(3):19–24. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41292254&> (accessed 20.01.2022). (In Russ.)
10. Rutsкая V.I. Experience of Use of Lupin and Products of Its Processing in Food Industry (Review). *Legumes and Groat Crops*. 2021;(1):83–89. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-1-83-89>
11. Feofilaktova O.V., Ponomarev A.S. Technological Property Research of the Alternative Flour Types while Food Producing in Catering in Catering. *Food Industry*. 2019;4(2):28–34. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2019-4-2-4>
12. Khodyreva Z.R., Schetinina M.P., Musina O.N., et al. Development of a Daily Diet for Children with Celiac Disease in Municipal Pre-School Educational Institutions. *Problems of Nutrition*. 2021;90(2):110–116. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-2-110-116>
13. Drakula S., Novotni D., Mustač N.Č., et al. Alteration of Phenolics and Antioxidant Capacity of Gluten-Free Bread by Yellow Pea Flour Addition and Sourdough Fermentation. *Food Bioscience*. 2021;44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101424>
14. Urubkov S.A., Khovanskaya S.S., Pyrieva E.A., et al. Gluten-Free Dry Mixtures with Rice and Amaranth for Children over Three Years Old with Gluten Intolerance. *Food Industry*. 2020;5(1):23–31. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2020-5-1-3>
15. Ushakova J.V., Paskova E.M., Rysmukhambetova G.E., Kulevatova T.B. Influence of the Composition of Composite Mixtures with a Reduced Gluten Content on the Rheological Properties of the Dough Based on Their Basis. *New Technologies*. 2020;(4):74–83. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2020-15-4-74-83>
16. Moskvicheva E.V., Safonova E.E., Timoshenkova I.A. Use of Flour from Seeds of Holy Thistle in the Manufacture of Gluten-Free Products. *International Research Journal*. 2017;(8)46–50. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.62.062>
17. Tiunov V.M., Chugunova O.V., Zavorokhina N.V. Feasibility of the Recipe Composition and Technological Features of Dry Mixtures Production for Gluten-Free Flour Culinary Products. *Bulletin of*

South Ural State University, Series "Food and Biotechnology". 2018;6(1):23–31. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.14529/food180103>

18. Bavykina I.A., Zvyagin A.A., Miroshnichenko L.A., et al. Efficient Products from Amaranth in a Gluten-Free Nutrition of Children with Gluten Intolerance. *Problems of Nutrition.* 2017;86(2):91–99. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28990194> (accessed 20.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

19. Kuznetsova L.I., Savkina O.A., Parakhina O.I., Lokachuk M.N. [Development of Biotechnology for Hypoallergenic Gluten-Free Bakery Products]. In: Materials of XVII All-Russian Congress with International Participation "Fundamental and Applied Aspects of Nutritiology and Dietetics. Therapeutic, Prophylactic and Sports Nutrition". Moscow; 2018. p. 221–222. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10331>

20. Chernyshova V.A., Labutina N.V., Belyavskaya I.G., et al. [The Effect of Linseed Flour on the Quality of Bread Products from a Mixture of Rye and Wheat Flour]. *Food Industry.* 2016;(5):66–69. (In Russ.)

21. Ershova T.A., Bozhko S.D., Chernyshova A.N., et al. Study of the Possibility of Using Vegetable Raw Materials for the Preparation of Dry Mixtures of Bakery Products. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products.* 2019;(3):32–42. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41746577> (accessed 20.01.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

22. Urubkov S.A., Khovanskaya S.S., Smirnov S.O. Selenium Content in Gluten-Free Products. *Problems of Nutrition.* 2021;90(1):102–107. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-1-102-107>

23. Moghadam F.T., Jalali H., Nafchi A.M., Nouri L. Investigating the Possibility of Producing Celiac Bread Using Lactic Acid Corn Sourdough Using *Lactobacillus Plantarum* at Two Levels of 5 and 10 %. *Journal of Food Science and Technology.* 2021;18(118):213–222. Available at: <https://fsct.modares.ac.ir/article-7-47755-en.html> (accessed 20.01.2022).

24. Wójcik M., Różyło R., Schönlechner R., Berger M.V. Physico-Chemical Properties of an Innovative Gluten-Free, Low-Carbohydrate and High Protein-Bread Enriched with Pea Protein Powder. *Scientific Reports.* 2021;11. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93834-0>

25. Ding X.-L., Wang L.-J., Li T.-T., et al. Pre-Gelatinisation of Rice Flour and Its Effect on the Properties of Gluten Free Rice Bread and Its Batter. *Foods.* 2021;10(1). doi: <https://doi.org/10.3390/foods10112648>

26. Khairuddin M.A.N., Lasekan O. Gluten-Free Cereal Products and Beverages: A Review of Their Health Benefits in the Last Five Years. *Foods.* 2021;10(11). doi: <https://doi.org/10.3390/foods10112523>

27. Qin W., Lin Z., Wang A., et al. Influence of Particle Size on the Properties of Rice Flour and Quality of Gluten-Free Rice Bread. *LWT.* 2021;151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112236>

28. Ronie M.E., Zainol M.K., Mamat H. A Review on the Recent Applications of Gluten-Free Flour, Functional Ingredients and Novel Technologies Approach in the Development of Gluten-Free Bakery Products. *Food Research.* 2021;5(5):43–54. doi: [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(5\).721](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(5).721)

29. Da Costa Borges V., Fernandes S.S., da Rosa Zavareze E., et al. Production of Gluten Free Bread with Flour and Chia Seeds (*Salvia Hispânica* L). *Food Bioscience.* 2021;43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101294>

30. Skendi A., Papageorgiou M., Varzakas T. High Protein Substitutes for Gluten in Gluten-Free Bread. *Foods.* 2021;10(9). doi: <https://doi.org/10.3390/foods10091997>

31. Qin W., Lin Z., Wang A., et al. Influence of Damaged Starch on the Properties of Rice Flour and Quality Attributes of Gluten-Free Rice Bread. *Journal of Cereal Science.* 2021;101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103296>

32. Filipini G., Passos A.P., Fernandes S.S., Salas-Mellado M.M. Nutritional Value, Technological and Sensory Evaluation of Gluten-Free Bread Enriched with Soybean Flour and Coconut Oil. *Journal of Food Measurement and Characterization.* 2021;15:3853–3861. doi: <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00971-1>

33. Kim W.-M., Yoon K.-H., Lee G.-H. Physicochemical Properties of Gluten Free Rice Pan Bread with Chickpea Flour Supplementation. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*. 2021;50(6):604–611. doi: <https://doi.org/10.3746/JKFN.2021.50.6.604>
34. Piga A., Conte P., Fois S., et al. Technological, Nutritional and Sensory Properties of an Innovative Gluten-Free Double-Layered Flat Bread Enriched with Amaranth Flour. *Foods*. 2021;10(5). doi: <https://doi.org/10.3390/foods10050920>
35. Roman L., Gomez M., Martinez M.M. Mesoscale Structuring of Gluten-Free Bread with Starch. *Current Opinion in Food Science*. 2021;38:189–195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.12.003>
36. Coda R., Varis J., Verni M., et al. Improvement of the Protein Quality of Wheat Bread through Faba Bean Sourdough Addition. *LWT – Food Science and Technology*. 2017;82:296–302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.062>
37. Shrivastava Ch., Chakraborty S. Bread from Wheat Flour Partially Replaced by Fermented Chickpea Flour: Optimizing the Formulation and Fuzzy Analysis of Sensory Data. *LWT*. 2018;90:215–223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.019>
38. Bourré L., McMillin K., Borsuk Yu., et al. Effect of Adding Fermented Split Yellow Pea Flour as a Partial Replacement of Wheat Flour in Bread. *Legume Science*. 2019;1. doi: <https://doi.org/10.1002/leg3.2>
39. Bojňanská T., Musilová J., Vollmannová A. Effects of Adding Legume Flours on the Rheological and Breadmaking Properties of Dough. *Foods*. 2021;10(5). doi: <https://doi.org/10.3390/foods10051087>
40. Bojňanská T., Vollmannová A., Lidiková J., Musilová J. Use of Common Buckwheat in the Production of Baked and Pasta Products. In: Waisundara V.Y. (ed.). *Pseudocereals*. London: IntechOpen; 2022. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.101960>
41. Hoehnel A., Bez J., Lykke I., et al. Enhancing the Nutritional Profile of Regular Wheat Bread While Maintaining Technological Quality and Adequate Sensory Attributes. *Food & Function*. 2020;11(5):4732–4751. doi: <https://doi.org/10.1039/d0fo00671h>
42. Di Biase M., Bavaro A.R., Lonigro S.L., et al. Lactobacillus Plantarum ITM21B Fermentation Product and Chickpea Flour Enhance the Nutritional Profile of Salt Reduced Bakery Products. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 2019;70(6):701–713. doi: <https://doi.org/10.1080/09637486.2019.1567699>
43. González-Montemayor Á.-M., Solanilla-Duque J.F., Flores-Gallegos A.C., et al. Green Bean, Pea and Mesquite Whole Pod Flours Nutritional and Functional Properties and Their Effect on Sourdough Bread. *Foods*. 2021;10(9). doi: <https://doi.org/10.3390/foods10092227>
44. Yaver E., Bilgiçli N. Ultrasound-Treated Lupin (Lupinus Albus L.) Flour: Protein- and Fiber-Rich Ingredient to Improve Physical and Textural Quality of Bread with a Reduced Glycemic Index. *LWT – Food Science and Technology*. 2021;148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111767>

Submitted 02.02.2022; approved after reviewing 20.03.2022; accepted for publication 10.04.2022
Поступила 02.02.2022; одобрена после рецензирования 20.03.2022; принята к публикации 10.04.2022

About the authors:

Anastasia A. Merker, Engineer of Laboratory of Biochemical and Spectral Analysis of Food, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1316-6179>, Researcher ID: AES-8646-2022, anastasia.merker@mail.ru

Ekaterina N. Reva, Engineer of Laboratory of Biochemical and Spectral Analysis of Food, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4010-925X>, Researcher ID: ADI-5646-2022, rewarewarewak@mail.ru

Valentina A. Serdyuk, Assistant of the Chair of Food Engineering and Technology, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3538-3358>, Researcher ID: B-8601-2018, valy11164@mail.ru

*Contribution of the authors:*

A. A. Merker – conducting experiments on kneading dough and moisture absorption capacity, and developing bakery product formulas, preparing the article text.

E. N. Reva – conducting experiments to determine the qualitative indicators of the dough, namely determining the shear stress, acidity, and pH. Revision of the article.

V. A. Serdyuk – scientific guidance, revision and design of the article.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Меркер Анастасия Андреевна, инженер лаборатории биохимического и спектрального анализа пищевых продуктов Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1316-6179>, Researcher ID: AES-8646-2022, anastasia.merker@mail.ru

Рева Екатерина Николаевна, инженер лаборатории биохимического и спектрального анализа пищевых продуктов Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4010-925X>, Researcher ID: ADI-5646-2022, rewarewarewak@mail.ru

Сердюк Валентина Александровна, ассистент кафедры техники и технологий пищевых производств Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3538-3358>, Researcher ID: B-8601-2018, valy11164@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

A. A. Меркер – проведение опытов по замесу теста и влагопоглощательной способности, разработка рецептуры, написание текста статьи.

E. N. Рева – проведение опытов по определению качественных показателей теста, а именно: определение напряжения сдвига, кислотности, pH среды. Доработка статьи.

V. A. Сердюк – научное руководство, доработка и оформление статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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 (по состоянию на 25.05.2022 г.):

05.20.01. Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

05.20.02. Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве (технические науки)

05.20.03. Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве (технические 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)

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Материалы и методы (Materials and Methods);

3) Результаты исследования (Results);

4) 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 использованных источников** (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 соавторов.** 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 ВОАИ 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 as at 25 May 2022):

Technologies and Means of Agricultural Mechanization
Electrotechnologies and Electrical Equipment in Agriculture
Technologies and Means of Maintenance in Agriculture
Instruments and Methods of Experimental Physics
Optics
Electrophysics, Electrophysical Installations

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of AntiPlagiat and CrossCheck systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

- 1) Introduction;
- 2) Materials and Methods;
- 3) Results;
- 4) 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. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levitsev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *А. Д. Карпов*
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 15.06.2022 г. Дата выхода в свет 30.06.2022 г.

Формат 70 × 100 $\frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 12,03.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 647. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»)



Editor *A. D. Karpov*
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. P. Gordina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 15.06.2022. Date of publishing 30.06.2022.

Sheet size 70 × 100 $\frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 12.03.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 647. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)