

doi: 10.15507/2658-4123.032.202204

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

Том 32, № 4. 2022

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

16+



Vol. 32, no. 4. 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 20.07.2022 г.):

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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 20 July 2022):

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

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, levtzevap@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)

Кечемайки 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»; академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, 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; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of RAS, 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

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Безруков А. В., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Купряшкин В. В. Методологическая основа для создания почвообрабатывающих фрез	490
Гуреев И. И. Приборное и методологическое обеспечение диагностики потребности растений в элементах питания	504

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Ионов П. А., Сенин П. В., Пьянзов С. В., Раков Н. В., Земсков А. М. Определение номинальных значений размеров и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники	520
Чаткин М. Н., Федоров С. Е., Жалнин А. А., Бычков М. В. Оценка эффективности почвообрабатывающего комбинированного культиватора	539
Димитров В. П., Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н. Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна	552
Труфляк Е. В., Бухарцев М. С., Сотников Д. А. Эффективность применения шин низкого давления при возделывании озимого ячменя	567
Гладких В. А., Власенко В. Д. Исследование поля и энергии в слабопроводящем оптоволокне со степенным профилем показателя преломления произвольной степени	588

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Долгих П. П. Обоснование применения технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц	600
Дорошенко В. А., Хозяев И. А., Яковлев Д. А., Дорошенко А. А., Щербаков А. А. Исследование теплофизических характеристик мышечной массы личинок черной львинки (<i>Hermetia illucens</i>) как объекта сушки	613
<i>Информация для авторов и читателей (на рус. яз.)</i>	630
<i>Информация для авторов и читателей (на англ. яз.)</i>	632

CONTENTS

AGRICULTURAL ENGINEERING

Bezrukov A. V., Naumkin N. I., Kupryashkin V. F., Kupryashkin V. V. Methodological Basis for Designing Tillage Cutters	490
Gureev I. I. Instrumental and Methodological Support for the Diagnostics of Nutritional Requirements of Plants.....	504

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Ionov P. A., Senin P. V., Pyanzov S. V., Rakov N. V., Zemskov A. M. Determination of Nominal Dimensions and Permissible Variations in Dimensions of Critical Parts of Foreign Machinery Units	520
Chatkin M. N., Fedorov S. Ye., Zhalnin A. A., Bychkov M. V. Evaluating the Operational Efficiency of a Combined Tillage Cultivator	539
Dimitrov V. P., Borisova L. V., Nurutdinova I. N. Method for Determining the Initial Values of the Adjustable Parameters of the Combine Harvester Cutting Unit.....	552
Truflyak E. V., Bukhartsev M. S., Sotnikov D. A. Efficiency of Low-Pressure Tires in the Cultivation of Winter Barley.....	567
Gladkikh V. A., Vlasenko V. D. Investigation of Field and Energy in a Weakly-Conducting Optical Fiber with an Arbitrary Degree of Refractive Index Profile.....	588

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Dolgikh P. P. Rationale for the Application of the Technological Scheme of Irradiation with Separation of Energy Flows in the Lighting Systems of Industrial Greenhouses	600
Doroshenko V. A., Khozyaev I. A., Yakovlev D. A., Doroshenko A. A., Shcherbakov A. A. Studying the Thermophysical Characteristics of the Muscle Mass of the Black Soldier Fly Larvae (<i>Hermetia Illucens</i>) as a Drying Object.....	613
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)</i>	630
<i>Information for Authors and Readers of the Journal (in English)</i>	632

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.316.44

doi: 10.15507/2658-4123.032.202204.490-503

Научная статья



Методологическая основа для создания почвообрабатывающих фрез

А. В. Безруков , Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин,
В. В. Купряшкин

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

 bezrukow157@yandex.ru

Аннотация

Введение. Рассматривается проблема повышения эффективности функционирования самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез за счет адаптации к изменяющимся условиям внешней среды, в частности, к изменяющимся физико-механическим свойствам почвы. Цель исследования – разработка методологии проектирования самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез.

Материалы и методы. В исследовании применялись основные положения теории механизмов и машин и теории проектирования в машиностроении. Основное внимание уделено общенаучному принципу адаптации при создании самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез. Авторы понимают этот принцип как способность автоматического обеспечения требуемого режима работы машины применительно к почвенным условиям.

Результаты исследования. Представленные в статье результаты позволили предложить методологический подход к созданию эффективных самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез с возможностью их адаптации к изменяющимся внешним условиям. Результаты представлены в виде методики проектирования фрез и нового технического решения их адаптации к почвенным условиям. На основе патентов на изобретения и полезные модели, в которых реализован этот способ, был разработан опытный образец фрезы, автоматически охватывающей весь требуемый диапазон режимов работы.

Обсуждение и заключение. По сравнению с известными фрезами такое техническое решение конструкции почвообрабатывающей фрезы позволяет повысить качество обработки почвы. Это происходит благодаря тому, что значение кинематического показателя находится в нужном диапазоне, а агротехнические требования, предъявляемые к обработке почвы, соблюдаются.

Ключевые слова: адаптация, обработка почвы, режимы работы, автоматизация, почвообрабатывающие фрезы, методология проектирования

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Безруков А. В., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Купряшкин 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.

Для цитирования: Методологическая основа для создания почвообрабатывающих фрез / А. В. Безруков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 490–503. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.490-503>

Original article

Methodological Basis for Designing Tillage Cutters

A. V. Bezrukov , N. I. Naumkin, V. F. Kupryashkin,
V. V. Kupryashkin

National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)

 bezrukow157@yandex.ru

Abstract

Introduction. The paper considers the problem of improving the efficiency of self-propelled small-sized tillage cutters by adapting to changing environments, and in particular, to changing physical and mechanical properties of the soil. The aim of the research is to develop a methodology for designing self-propelled small-sized tillage cutters.

Materials and Methods. The study used the basic provisions of the theory of mechanisms and machines and the design theory in mechanical engineering. The main attention is paid to the general scientific principle of adaptation in designing self-propelled small-sized tillage cutters. The authors understand this principle as the ability to automatically provide the required mode of machine operation in relation to the soil conditions.

Results. The results presented in the article made it possible to propose a methodological approach to designing efficient self-propelled small-sized tillage cutters with an ability to adapt them to changing environments. The results of the study are a methodology for designing tillage cutters and a new technical solution for their adaptation to soil conditions. On the basis of patents for inventions and utility models, in which this method is implemented, there was developed a prototype tillage cutter, which automatically covers the full range of required operating modes.

Discussion and Conclusion. Compared to the known tillage cutters, the proposed technical solution for the soil tillage cutter design allows improving the quality of soil tillage. This is due to the fact that the value of the kinematic index is in the required range, and the agrotechnical requirements for tillage are met.

Keywords: adaptation, tillage, operating modes, automation, tillage cutters, design methodology

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

For citation: Bezrukov A.V., Naumkin N.I., Kupryashkin V.F., Kupryashkin V.V. Methodological Basis for Designing Tillage Cutters. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):490–503. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.490-503>

Введение

В настоящее время технологические процессы, реализуемые в агропромышленном комплексе, в частности обработка почвы, невозможны без использования современных высокопроизводительных почвообрабатывающих машин и орудий. Однако в условиях

жестких требований, предъявляемых к качеству обработки почвы, не все существующие машины могут применяться для этого в силу значительной неоднородности физико-механических свойств почвы и ее состояния. Поэтому задача проектирования сельскохозяйственных машин с возможностью их

адаптации к изменяющимся почвенным условиям является актуальной.

Как показывают исследования, качество обработки почвы определяется такими показателями, как 1) рыхление, аэрация и крошение уплотненной почвы; 2) перемешивание верхнего слоя почвы; 3) уничтожение сорняков путем подрезания или прикрытия слоем почвы; 4) выравнивание поверхности поля и подготовка семенного ложа; 5) обеспечение минимальной высоты гребней дна борозды; 6) соблюдение нормированных режимов работы машины, в частности возможности изменять степень измельчения почвы; 7) сроки выполнения работ; 8) соблюдение технического состояния почвообрабатывающих машин (форма рабочих органов, правильность регулировки и т. п.) и др. [1–4]. Только применение адаптивных машин позволяет обеспечить выполнение перечисленных требований и повысить производительность работы, что является залогом хорошего урожая продовольственных культур¹ [5–7].

Все эти показатели важны для решения сформулированных задач, но в нашем исследовании особое внимание уделяется соблюдению нормированных режимов работы машины, соответствующих состоянию обрабатываемой почвы. Это позволяет отслеживать изменение параметров почвы и задавать необходимые режимы работы почвообрабатывающей машине.

Наиболее эффективно это реализуется в самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фреззах (СМПФ) [8–11]. Они используются для фрезерования почвы в личных подсобных, фермерских, тепличных хозяйствах и незаменимы в условиях ограничения участков местности. СМПФ

применяется для уничтожения сорняков, равномерного перемешивания удобрений с почвой, создания мелкокомковатого строения разрыхляемого слоя, водообеспечения почвы, повышения ее микробиологической активности и интенсивности «дыхания», создает глубинные запасы влаги, а также способствует усилению в почве процессов нитрификации, создавая благоприятные условия для минерального питания выращиваемых культур.

Однако большинство выпускаемых сегодня СМПФ обладают рядом недостатков: 1) высокие динамические нагрузки, возникающие во фрезе во время работы; 2) нестабильность протекания процесса обработки почвы; 3) повышение утомляемости оператора; 4) неравномерность загрузки двигателя на различных обрабатываемых участках; 5) перегрузка элементов привода; 6) трудности в изменении режимов работы; 7) невозможность автоматической подстройки под внешние изменяемые почвенные условия [5; 9; 10].

В связи с этим возникает задача разработать общие правила создания фрез, следуя которым можно устранить вышеперечисленные недостатки.

Цель исследования – разработать методологию для создания СМПФ.

Для достижения предложенной цели необходимо решить следующие задачи: 1) выполнить анализ имеющихся исследований по сформулированной проблеме; 2) выявить наиболее значимые методологические подходы, методы и приемы проектирования почвообрабатывающих фрез; 3) выделить наиболее важные методологические аспекты при проектировании СМПФ; 4) выявить принципы функционирования фрез (адаптация, отсутствие избыточных связей, возможность конвертации в ходе

¹ Чаткин М. Н. Кинематика и динамика ротационных почвообрабатывающих рабочих органов с винтовыми элементами. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2008. 313 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004106561> (дата обращения: 21.06.2022).

проектирования и др.); 5) синтезировать новый способ адаптации на основе отслеживания изменяющихся условий и разработать устройство для этого.

Обзор литературы

Большинство исследований посвящены повышению функционирования СМПФ за счет отдельно рассматриваемого фактора и не имеют системного характера или методических рекомендаций.

Так, вопросы адаптации ротационных почвообрабатывающих машин к изменяющимся условиям обрабатываемой почвы ранее становились объектами исследования [1–7]. При этом под адаптацией понималось обеспечение работы машины в постоянно изменяющихся условиях внешней среды. Мы в дальнейшем под адаптацией будем понимать способность автоматического обеспечения требуемого режима работы машины применительно к почвенным условиям [8]. Ниже представлены основные результаты этих работ.

Отечественные ученые предлагают осуществлять адаптацию за счет 1) сохранения постоянного угла резания в течение всего цикла резания почвы для одного или всех кинематических режимов; 2) обеспечения всего диапазона режимов регулирования с вмешательством оператора; 3) внедрения блока управления, автоматически изменяющего режим работы машины² [8–11].

Одним из первых эту проблему применительно к почвообрабатывающим фрезам в нашей стране начал изучать Г. Ф. Попов, который предложил способ и устройство обеспечения постоянства угла резания фрезы за всю фазу отрезания почвенной стружки. Во время работы барабана каждый нож фрезы

описывает траекторию трохойды с минимальным отклонением от нее. Практическое применение такого рабочего органа позволяет снизить энергоемкость фрезерования на 30 % при сохранении заданных агротехнических требований. Однако конструкция таких фрезерных барабанов оказалась значительно сложнее обычных, кроме того, у нее только один режим работы, обусловленный конкретными почвенными условиями, что является сдерживающим фактором их практического использования³.

В работе В. Ф. Купряшкина и А. С. Князькова для устранения этих недостатков и плавного регулирования угла резания предлагается использовать пространственный кулачок со сложной криволинейной поверхностью, по которой ролик ножа будет перемещаться вдоль вала и задавать определенный закон его движения для любой поступательной скорости СМПФ в соответствии со свойствами почвы и в заданном диапазоне. Обязательным условием нормальной работы такого кулачкового механизма является наличие замыкания кулачкового механизма, то есть обеспечение постоянного контакта ролика и кулачка [9].

В исследованиях В. Ф. Купряшкина бесступенчатое регулирование скорости и подачи на нож обеспечивается за счет использования в приводе ходовых колес СМПФ клиноременного вариатора. Изменение передаточного отношения клиноременного вариатора в такой фрезе осуществляется путем вращения маховичка, расположенного на резьбовом участке вала двигателя привода ходовых колес [10; 11].

В ранних исследованиях авторов был предложен способ адаптации

² Попов Г. Ф. Исследование технологических режимов и обоснование конструктивных параметров рабочих органов пропашных фрезерных культиваторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 23 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007331052> (дата обращения: 21.06.2022).

³ Там же.

машины на основе обеспечения возможности автоматического регулирования режимов работы фрезы (изменение поступательной скорости) за счет блока управления частотой вращения (БУЧВ) ее электродвигателей, в зависимости от изменения свойств обрабатываемой почвы [8]. Для его реализации был сконструирован и изготовлен опытный образец СМПФ с адаптацией режимов работы к изменяющимся почвенным условиям. Для этого в конструкцию машины добавили двигатель привода ходовых колес, который управляется через БУЧВ. Он при помощи сканера твердости почвы отслеживает изменение структуры почвы и подстраивает режимы работы машины к внешним условиям.

Интересен опыт зарубежных исследователей по разрешению этой проблемы. Ряд авторов, используя научный метод аналогии, предложили для снижения среднего сопротивления резанию использовать в ротационных почвообрабатывающих машинах бионические режущие зубья [12]. Китайские исследователи для снижения рабочего сопротивления и увеличения производительности провели оптимизацию конструкции роторной почвообрабатывающей машины на основе моделирования процесса выемки с дискретным элементом [13]. Аналогичные исследования проводились применительно к почвообрабатывающим фрезам для очистки соломы и стерни, оставшихся после сбора урожая, в сельском хозяйстве без обработки почвы [14–17]. С помощью метода имитационного анализа дискретных элементов определялся оптимальный угол изгиба стерневой фрезы. Для соблюдения агротехнических требований гонконгскими учеными

при помощи теоретического анализа и автоматизированного проектирования был разработан саморегулирующийся резак для стерни, повышающий производительность работы и снижающий сопротивление резанию [18–20]. Они же предложили метод работы полосового типа с меньшей обработкой почвы и разработали приводной резак для стерни [21; 22]. Для многофакторных экспериментов адаптивных роторных почвообрабатывающих машин был разработан испытательный стенд, моделирующий полевые условия для повышения эффективности проектирования новых машин [23].

Таким образом, из обзора литературы следует, что проблема адаптации ротационных почвообрабатывающих машин актуальна во всем мире и решают ее по-разному. Предложенные способы и средства их реализации в основном позволяют обеспечить решение сформулированных частных задач. Однако в этих исследованиях не решается такая важная проблема, как адаптация.

Материалы и методы

Методология представленного исследования построена на интеграции основных положений теории механизмов и машин в области исследования механических систем и положений теории проектирования в машиностроении вообще и сельхозмашиностроении в частности [10; 24; 25]. Мы также использовали методы морфологического анализа и классификации вместе с методами анализа-синтеза и дедукции-индукции для поиска нового технического решения⁴. Под методом будем понимать сбалансированную систему эмпирического и теоретического уровней исследования, позволяющую

⁴ Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Грошева Е. П. Методология научного творчества : учебник. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 200 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008146532> (дата обращения: 21.06.2022).

операционально, последовательно и поэтапно получать и обобщать новое научное знание от фактов до законов и теорий [26].

Наше основное внимание было уделено общенаучному принципу адаптации и его использованию при создании СМПФ. В наиболее общем виде содержание и структуру методики проектирования фрез можно представить рядом основных субординированных этапов, которые представлены в таблице.

Результаты исследования

Последовательное прохождение этапов (табл.) позволило нам спроектировать и создать новую СМПФ, которая обеспечивает нахождение значения кинематического параметра ($\lambda = v_o / v_n$, где v_o – окружная скорость активных рабочих органов, м/с; v_n – поступательная скорость фрезы, м/с) в требуемом (допустимом) диапазоне изменения ($\lambda = 4–6$)

и адаптацию режимов работы фрезы к почвенным условиям (рис. 1)⁵ [27].

Первый этап проектирования (табл.) подробно раскрыт нами в обзоре литературы настоящей статьи. В рамках второго и третьего этапов было синтезировано техническое решение, в котором за основополагающий критерий, при соблюдении всех вышеперечисленных основных требований к фрезе, был принят принцип адаптации машины. При этом авторы руководствовались основными положениями теории и алгоритма решения изобретательских задач (ТРИЗ и АРИЗ), в соответствии с которыми был пройден путь от постановки проблемы и получения идеального технического решения до конкретного инновационного продукта: способ адаптации СМПФ к меняющимся почвенным условиям и устройство для его реализации⁶ [26].

Т а б л и ц а

T a b l e

Этапы методики проектирования почвообрабатывающих фрез
Stages of designing the methodology of tillage cutters

№	Этапы проектирования / Design stages
1	Анализ проблемной ситуации существующих недостатков, выдвижение проблемного замысла, обоснование и формулировка проблемы, конкретизация проблемы в задачах / Analyzing the problem situation of existing shortcomings, developing the problem plan, understanding and formulating the problem, specifying the problem in the tasks
2	Выдвижение первичного предположения, рабочей и развернутой гипотезы / Making initial, working and extended hypotheses
3	Обоснование гипотезы путем установления ее экспериментальной проверяемости, теоретической обоснованности, логической состоятельности и достоверности / Justifying the hypothesis by establishing its experimental verifiability, theoretical validity, logical consistency, and credibility
4	Программа экспериментального исследования, выбор процедур и технических средств, разработка опытного образца фрезы / Developing the program of experimental research, choosing procedures and technical means, designing a prototype cutter
5	Проведение полевых экспериментов, сбор и обработка данных наблюдения и измерений / Conducting field experiments, collecting and processing observation and measurement data
6	Сравнение экспериментальных данных с содержанием предлагаемой гипотезы, ее принятие, доработка или отбрасывание / Comparison of experimental data with the content of the proposed hypothesis, its acceptance, refinement or rejection
7	Формулирование нерешенных задач и новой научной проблемы (подпроблемы) / Formulation of unsolved problems and a new scientific problem (subproblem)

⁵ Яцук Е. П., Панов И. М., Ефимов Д. П. Ротационные почвообрабатывающие машины. М.: Машиностроение, 1971. 256 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007206070> (дата обращения: 13.09.2022).

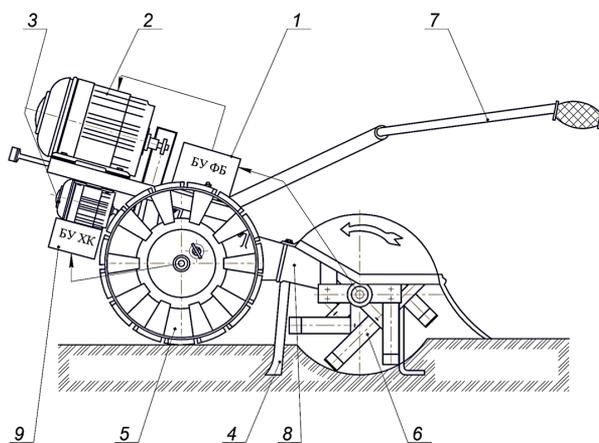
⁶ Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Грошева Е. П. Методология научного творчества.

Предложенная машина состоит из корпуса 8, органов управления 7, блока управления 1 частотой вращения вала электродвигателя 2 привода активных рабочих органов 6, блока управления 9 частотой вращения вала электродвигателя 3 привода ходовых колес 5, связанного со сканером твердости почвы 4 с возможностью отслеживания изменения плотности почвы.

Устройство работает следующим образом. СМПФ подводят к краю обрабатываемого участка. Электропитание электродвигателей 2 и 3 осуществляется через блоки 1 и 9 управления частотами вращения их валов. Вначале включают электродвигатель 2 привода активных рабочих органов 6, затем электродвигатель 3 привода ходовых колес 5. Одновременно с началом движения почвообрабатывающей фрезы происходит заглубление сканера 4 сопротивления резания почвы и активных рабочих органов 6. При движении на уплотненных участках сканер 4 отслеживает изменение сопротивления резания почвы

и подает сигнал на блоки управления 1 и 9, которые изменяют частоты вращения валов электродвигателей 2 и 3. То есть при движении по уплотненному участку почвы поступательная скорость машины уменьшается и увеличивается частота вращения активных рабочих органов, по участку с меньшей твердостью наоборот, за счет чего почвообрабатывающая фреза адаптирует режим работы под внешние условия, тем самым позволяет обеспечивать требуемое значение кинематического параметра λ и качество обработки почвы.

Подтверждением правильности принятых решений являются исследования А. А. Курочкина, в которых предложено методы проектирования машин и аппаратов перерабатывающих производств делить на две большие группы: эвристические и алгоритмические⁷. Эвристические методы представляют собой упорядоченные правила и рекомендации, помогающие при решении задач проектирования без предварительной оценки результата. К наиболее



Р и с. 1. Схема фрезы с блоками управления
F i g. 1. Diagram of the tillage cutter with control units

⁷ Курочкин А. А., Зимняков В. М. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов перерабатывающих производств / Под ред. А. А. Курочкина. М. : КолосС, 2006. 318 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002887336> (дата обращения: 21.06.2022).

распространенным из них относятся: элементарных вопросов; аналогов; от целого к частному (принцип синергии); наводящих операций; коллективное спонтанное мышление (мозговой штурм) и др. Алгоритмические методы используют возможности дедукции, стремясь к оценке операций, а также определению их очередностей и связей. В результате создается ряд последовательных и приближающих к цели процедур (логических и математических алгоритмов).

Для разработки четвертого этапа (табл.) использовались методы теории механизмов и машин в области исследования механических систем и положения теории проектирования в машиностроении, а именно: 1) классическая методика проектирования и конструирования деталей и машин советских ученых П. И. Орлова⁸, Г. И. Рощина⁹, В. И. Анурьева¹⁰ [23], П. Ф. Дунаева, О. П. Леликова¹¹ и др.; 2) методологический подход А. В. Добринова [24] для создания сельскохозяйственной техники от организации исследования до процессов разработки, конструирования и производства, позволяющий разработать общую структурную модель процесса проектирования почвообрабатывающего агрегата, обосновать параметры машины и ее рабочие органы путем исследований, инженерных расчетов, математического и физического моделирования процессов

и в конечном итоге обеспечить многофункциональность и высокий уровень универсальности проектируемой техники; 3) универсальная структурная система поиска структур кинематических цепей любой сложности профессора Л. Т. Дворникова, позволяющая синтезировать возможные кинематические цепи любой сложности с возможностью их изображения в зубчатом варианте, включая метод идентификации стержневых механизмов с зубчатыми Дворникова – Садиевой¹², основанный на выборе ведущих звеньев и базисного звена с кинематическими парами пятого и четвертого классов. Спроектированный и изготовленный опытный образец фрезы показан на рисунке 2.

Такой ход исследований авторов подтверждается также содержанием работы в соавторстве с Н. И. Джабборовым, в которой проведено компьютерное моделирование и проектирование энергоэффективных почвообрабатывающих рабочих органов и машин с учетом комплексного взаимодействия почвы и рабочих органов в процессе ее обработки. При проведении исследований применялись методы математического моделирования, анализ и обобщение теоретических и расчетных данных [25].

Пятый и шестой этапы проводились на контрольных участках открытого грунта КФХ «Елисеев А. Н.» Ромодановского района РМ и на полигоне Института механики и энергетики МГУ

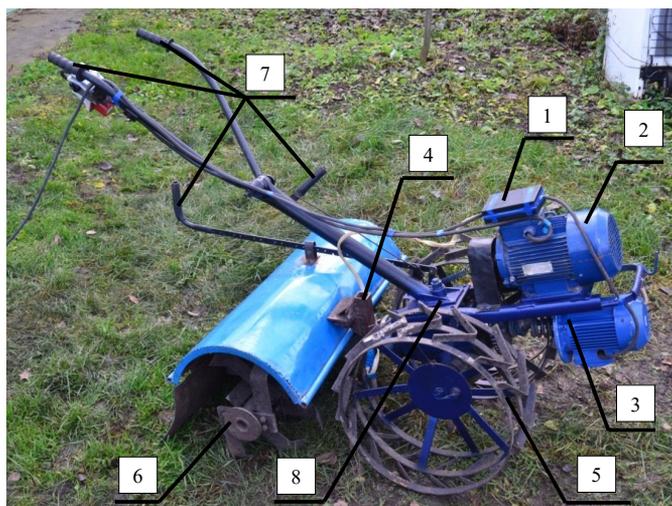
⁸ Орлов П. И. Основы конструирования : Справочно-методическое пособие. В 2 кн. Кн. 1 / Под ред. П. Н. Учаева. Изд. 3-е, испр. М. : Машиностроение, 1988. 560 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001417878> (дата обращения: 21.06.2022).

⁹ Детали машин и основы конструирования : учебник для бакалавров / под ред. Г. И. Рощина, Е. А. Самойлова. М. : Издательство Юрайт, 2012. 415 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005080513> (дата обращения: 21.06.2022).

¹⁰ Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Изд. 7-е в 3 т. М. : Машиностроение, 1992. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001097565> (дата обращения: 21.06.2022).

¹¹ Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Детали машин. Курсовое проектирование: учебное пособие. 5-е изд., доп. М. : Машиностроение, 2004. 560 с. URL: <https://studizba.com/files/show/pdf/4145-1-detaili-mashin-kursovoe-proektirovanie.html> (дата обращения: 21.06.2022).

¹² Садиева А. Э. Разработка методов структурного синтеза сложных зубчатых механизмов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Бишкек, 2010. 31 с. URL: http://arch.kyrlibnet.kg/uploads/KSTUSADIEVA_A.pdf (дата обращения: 21.06.2022).



Р и с. 2. Общий вид опытного образца фрезы: 1 – блок управления с обратной связью; 2 – электродвигатель привода рабочих органов; 3 – электродвигатель привода ходовых колес; 4 – сканер твердости почвы; 5 – ходовые колеса; 6 – рабочие органы; 7 – органы управления; 8 – редуктор

F i g. 2. General view of the prototype tillage cutter: 1 – feedback control unit; 2 – electric motor of the drive for working tools; 3 – electric motor of the drive for running wheels; 4 – soil hardness scanner; 5 – running wheels; 6 – working tools; 7 – operating controls; 8 – gear box

им. Н. П. Огарева. Перед проведением полевых испытаний оценивались физико-механические свойства почвы контрольных участков путем определения влажности, твердости, коэффициентов объемного смятия и трения почвы [8; 26].

Седьмой этап представлен в следующем разделе статьи. По сравнению с известными решениями предлагаемая фреза позволяет повысить качество обработки почвы за счет обеспечения значения кинематического показателя λ обработки почвы в нужном диапазоне, соблюсти агротехнические требования, предъявляемые к обработке почвы, а также повысить эффективность функционирования.

Обсуждение и заключение

Представленные в статье исследования позволили актуализировать, доработать и конкретизировать мето-

дологию проектирования и создания самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез. В ходе ее реализации были получены важные научные результаты.

Выполнен по известным авторским методикам анализ имеющихся исследований по обозначенной проблеме, позволивший выявить наиболее перспективные и хорошо реализуемые способы и устройства адаптации фрез как в нашей стране, так и за рубежом¹³.

Такой анализ позволил создать методику проектирования фрез и синтезировать новый способ их адаптации на основе отслеживания изменяющихся условий, а также разработать устройство реализации этого способа [26].

Создан опытный образец СМПФ. Для этого была создана техническая документация на основании известных положений теории проектирования

¹³ Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Грошева Е. П. Методология научного творчества.

и конструирования промышленных изделий [23].

Таким образом, все рассмотренные почвообрабатывающие фрезы находят свое применение в определенных условиях, но для эффективной обработки почвы рекомендуется использовать предложенную СМПФ [24]. Такая фреза позволяет автоматически охватить весь диапазон режимов работы, отвечающих изменяющейся плотности почвы на обрабатываемых участках, тем самым сохранить значение кинематического параметра в требуемом

диапазоне и обеспечить требуемое качество обработки почвы при оптимальном сочетании с высокой производительностью работ, что подтверждено проведенными экспериментальными исследованиями [20].

Будущее выполненных исследований видится в автоматизации работы СМПФ и ее цифровой трансформации. Материалы статьи будут полезны исследователям, чьи работы связаны с проблемами проектирования почвообрабатывающих машин вообще и почвообрабатывающих фрез в частности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тарчоков Х. Ш., Бжинаев Ф. Х. Агротехника в борьбе с сорняками // Инновации и продовольственная безопасность. 2018. № 4. С. 46–50. doi: <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2018-0-4-46-50>
2. Гуреев И. И. Экологическая безопасность комплексной механизации агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, № 5. С. 62–64. doi: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10515>
3. Пархоменко Г. Г., Пархоменко С. Г. Экологически безопасная эксплуатация технических средств в условиях физической деградации почвы // Технический сервис машин. 2019. № 2. С. 40–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38537510> (дата обращения: 21.06.2022).
4. Снижение потерь почвенной влаги на испарение / Ю. А. Савельев [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 1. С. 42–47. doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-42-47>
5. Николаев В. А., Трошин Д. И. Анализ взаимодействия правого ножа агрегата непрерывного действия с грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 4. С. 452–463. doi: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>
6. Старовойтов С. И., Ахалая Б. Х., Миронова А. В. Конструктивные особенности рабочих органов для уплотнения и выравнивания поверхности почвы // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 4. С. 51–56. URL: https://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2020/01/ВИ-ЭСХ_4_2019.pdf (дата обращения: 27.06.2022).
7. Babitsky L. F., Sobolevsky I. V., Kuklin V. A. Bionic Modelling of the Working Bodies of Machines for Surface Tillage [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 488. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012041>
8. Безруков А. В., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф. Автоматизация режимов работы самоходной фрезы // Сельский механизатор. 2019. № 2. С. 6–7. URL: <http://selmech.msk.ru/219.html#> (дата обращения: 21.06.2022).
9. Князьков А. С., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф. Повышение эффективности функционирования самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез путем использования адаптивных энергоэффективных рабочих органов // Вестник Мордовского университета. 2014. № 1. С. 186–194. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles/38-14-12/213-10-15507-vmu-025-201502-72> (дата обращения: 21.06.2022).
10. Обоснование параметров динамического стабилизатора устойчивости движения подвижного модуля экспериментального стенда при исследовании активных ротационных рабочих органов

почвообрабатывающих машин / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 1. С. 52–66. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201701.052-066>

11. Купряшкин В. Ф., Наумкин Н. И., Купряшкин В. В. Исследование устойчивости движения подвижного модуля экспериментальной установки при испытании активных ротационных рабочих органов почвообрабатывающих машин // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 2. С. 246–258. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201602.246-258>

12. Study on the Reduction of Soil Adhesion and Tillage Force of Bionic Cutter Teeth in Secondary Soil Crushing / C. Guan [et al.] // Biosystems Engineering. 2022. Vol. 213. P. 133–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.018>

13. Design and Test of Resistance-Reducing Excavation Device of Cyperus Edulis Based on Discrete Element Method / X. He [et al.] // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2021. Vol. 52, Issue 12. P. 124–133. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.013>

14. Design and Test of Precision Rotary-Ridging Machine for Sticky Soil / T. Zhang [et al.] // Agricultural Research in the Arid Areas. 2022. Vol. 40, Issue 2. P. 250–258. doi: <https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2022.02.30>

15. Design and Experiments of Active Anti-Blocking Device with Forward-Reverse Rotation [Электронный ресурс] / H. Zhu [et al.] // Nongye Gongcheng Xuebao. 2022. Vol. 38, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2022.01.001>

16. Design and Test of Lateral Stubble Cleaning Blade for Corn Stubble Field / S. Hou [et al.] // Nongye Gongcheng Xuebao. 2020. Vol. 36, Issue 2. P. 59–69. doi: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.02.008>

17. Simulation and Optimization of Working Parameters of Stubble Breaking Device in Two Ripening Area of Yumai in North China [Электронный ресурс] / X. Zhang [et al.] // 2021 ASABE Annual International Virtual Meeting. 2021. doi: <https://doi.org/10.13031/aim.202101112>

18. Design and Experiment of Passive Disc Cutting Blade in Corn Ridges / J. Wang [et al.] // Nongye Jixie Xuebao. 2021. Vol. 52, Issue 11. P. 59–67. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.006>

19. Design and Experiment of Driving Stubble Cutter for Corn Strip with Less Tillage Operation / J. Wang [et al.] // Nongye Jixie Xuebao. 2021. Vol. 52, Issue 8. P. 51–61. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.005>

20. Design and Experiment of Stubble Chopping and Scattering Device Based on 2bmfj-12 No-Tillage Precision Planter / S. Hou [et al.] // Applied Engineering in Agriculture. 2021. Vol. 37, Issue 6. P. 1031–1043. doi: <https://doi.org/10.13031/aea.14738>

21. Optimal Design and Experiment of Deep-buried Reverse Rotating Sliding Cutting Straw Returning Blade / J. Wang [et al.] // Nongye Jixie Xuebao. 2021. Vol. 52, Issue 11. P. 28–39. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.003>

22. Design of Biaxial Rotary Tillage Soil Test Bench and Layered Tillage Test / C. Guan [et al.] // Nongye Gongcheng Xuebao. 2021. Vol. 37, Issue 10. P. 28–37. doi: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.10.004>

23. Effects of Shallow Non-Inversion Tillage on Sandy Loam Soil Properties and Winter Rye Yield in Organic Farming [Электронный ресурс] / M. Hofbauer [et al.] // Soil and Tillage Research. 2022. Vol. 222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105435>

24. Добринов А. В. Методологический подход к современному проектированию сельскохозяйственных машин // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2008. № 80. С. 177–186. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22937775> (дата обращения: 21.02.2022).

25. Джаббаров Н. И., Добринов А. В. Оптимальное проектирование почвообрабатывающих машин с учетом их потребной мощности // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 1. С. 50–62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46105669> (дата обращения: 21.02.2022).

26. Почвообрабатывающая фреза с адаптацией работы : патент 2000945 Российская Федерация / Безруков А. В., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф. № 2020129321 ; заявл. 04.09.2020 ; опубл. 20.11.2020, Бюл. № 32. 2 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44370020> (дата обращения: 21.02.2022).

27. Безруков А. В., Наумкин Н. И. Способы адаптации режимов работы почвообрабатывающих фрез // Сельский механизатор. 2022. № 3. С. 22–23. URL: <http://selmech.msk.ru/322.html> (дата обращения: 21.02.2022).

Поступила 05.07.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 29.09.2022

Об авторах:

Безруков Анатолий Владимирович, доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8511-2743>, Researcher ID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Наумкин Николай Иванович, и.о. заведующего кафедрой основ конструирования механизмов и машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), доктор педагогических наук, кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, ResearcherID: L-4643-2018, naumn@yandex.ru

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

Купряшкин Владимир Владимирович, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5327-4089>, kupvovan@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. В. Безруков – литературный и патентный анализ, проведение лабораторных исследований, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста, визуализация.

Н. И. Наумкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, доработка текста.

В. Ф. Купряшкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, критический анализ.

В. В. Купряшкин – литературный и патентный анализ, обработка результатов теоретических исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Tarchokov H.S., Bzhinaev F.H. Agrotechnology in Fight against Weeds. *Innovations and Food Safety*. 2018;(4):46–50. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2018-0-4-46-50>
2. Gureev I.I. Environmental Safety of Complex Mechanization of Agricultural Crops Cultivation Technologies. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2019;33(5):62–64. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10515>
3. Parkhomenko G.G., Parkhomenko S.G. Ecologically Safe Operation of Technical Facilities in Conditions of Physical Degradation of Soil. *Machinery Technical Service*. 2019;(2):40–46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38537510> (accessed 21.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

4. Savelev Yu.A., Kuharev O.N., Larjushin N.P., et al. Soil Moisture Loss Reduction Owing to Evaporation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018;12(1):42–47. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-42-47>
5. Nikolayev V.A., Troshin D.I. Continuous Action Right Knife Unit with Ground Interaction Analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(4):452–463. doi: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>
6. Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Mironova A.V. Design Features of Working Tools for Soil Surface Compaction and Leveling. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019;(4):51–56. Available at: https://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2020/01/ВИЭСХ_4_2019.pdf (accessed 27.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Babitsky L.F., Sobolevsky I.V., Kuklin V.A. Bionic Modelling of the Working Bodies of Machines for Surface Tillage. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 488. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012041>
8. Bezrukov A.V., Naumkin N.I., Kupryashkin V.F. Automation of Self-Propelled Cutter Operation Modes. *Selskiy mekhanizator*. 2019;(2):6–7. Available at: <http://selmech.msk.ru/219.html#> (accessed 21.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Knyaz'kov A.S., Naumkin N.I., Kupryashkin V.F. Improvement of the Operating Effect of Small Self-Propelled Rotary Tillers by Using Adaptive Ower Efficient Tools. *Mordovia University Bulletin*. 2014;(1):186–194. Available at: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles/38-14-12/213-10-15507-vmu-025-201502-72> (accessed 21.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Kupryashkin V.F., Naumkin N.N., Knyazkov A.S., et al. Justification for Parameters of a Dynamic Stabilizer of the Experimental Stand Mobile Unit in Studying of Active Rotational Working Tools of Tiller Machines. *Mordovia University Bulletin*. 2017;27(1):52–66. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.027.201701.052-066>
11. Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Kupryashkin V.V. Stability of Motion of Mobile Module of Experimental Setup in the Study of Active Rotary Working of Machines for Soil Treatment. *Mordovia University Bulletin*. 2016;26(2):246–258. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.026.201602.246-258>
12. Guan C., Fu J., Xu L., et al. Study on the Reduction of Soil Adhesion and Tillage Force of Bionic Cutter Teeth in Secondary Soil Crushing. *Biosystems Engineering*. 2022;213:133–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.018>
13. He X., Zhang X., Zhao Z., et al. Design and Test of Resistance-Reducing Excavation Device of *Cyperus Edulis* Based on Discrete Element Method. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2021;52(12):124–133. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.013>
14. Zhang T., Li Y., Zhang X., et al. Design and Test of Precision Rotary-Ridging Machine for Sticky Soil. *Agricultural Research in the Arid Areas*. 2022;40(2):250–258. doi: <https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2022.02.30>
15. Zhu H., Qian C., Bai L., et al. Design and Experiments of Active Anti-Blocking Device with Forward-Reverse Rotation. *Nongye Gongcheng Xuebao*. 2022;38(1). doi: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2022.01.001>
16. Hou S., Chen H., Zou Z., et al. Design and Test of Lateral Stubble Cleaning Blade for Corn Stubble Field. *Nongye Gongcheng Xuebao*. 2020;36(2):59–69. doi: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.02.008>
17. Zhang X., Wang J., Lao F., et al. Simulation and Optimization of Working Parameters of Stubble Breaking Device in Two Ripening Area of Yumai in North China. In: 2021 ASABE Annual International Virtual Meeting. 2021. doi: <https://doi.org/10.13031/aim.202101112>
18. Wang J., Zhao S., Gao L., et al. Design and Experiment of Passive Disc Cutting Blade in Corn Ridges. *Nongye Jixie Xuebao*. 2021;52(11):59–67. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.006>
19. Wang J., Zhao S., Yang Z., et al. Design and Experiment of Driving Stubble Cutter for Corn Strip with Less Tillage Operation. *Nongye Jixie Xuebao*. 2021;52(8):51–61. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.005>
20. Hou S., Zhu Y., Zhu X., et al. Design and Experiment of Stubble Chopping and Scattering Device Based on 2bmfj-12 No-Tillage Precision Planter. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021;37(6):1031–1043. doi: <https://doi.org/10.13031/aea.14738>

21. Wang J., Zhang X., Tang H., et al. Optimal Design and Experiment of Deep-buried Reverse Rotating Sliding Cutting Straw Returning Blade. *Nongye Jixie Xuebao*. 2021;52(11):28–39. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.003>
22. Guan C., Cui Z., Gao Q., et al. Design of Biaxial Rotary Tillage Soil Test Bench and Layered Tillage Test. *Nongye Gongcheng Xuebao*. 2021;37(10):28–37. doi: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.10.004>
23. Hofbauer M., Bloch R., Bachinger J., et al. Effects of Shallow Non-Inversion Tillage on Sandy Loam Soil Properties and Winter Rye Yield in Organic Farming. *Soil and Tillage Research*. 2022;222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105435>
24. Dobrinov A.V. [Methodological Approach to Modern Agricultural Machine Design]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva*. 2008;(80):177–186. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22937775> (accessed 21.02.2022). (In Russ.)
25. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V. Optimal Designing of Tillage Machines with Due Account for Their Required Power. *AgroEkoInzheneriya*. 2021;(1):50–62. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46105669> (accessed 21.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
26. Bezrukov A.V., Naumkin N.I., Kupryashkin V.F. [Soil Tillage Cutter with Work Adaptation]. Patent 2,000,945 Russian Federation. 2020 November 20. 2 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44370020> (accessed 21.02.2022). (In Russ.)
27. Bezrukov A.V., Naumkin N.I. Ways to Adapt the Operating Modes of Tillage Cutters. *Selskiy mekhanizator*. 2022;(3):22–23. Available at: <http://selmech.msk.ru/322.html> (accessed 21.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 05.07.2022; approved after reviewing 22.09.2022; accepted for publication 29.09.2022

About the authors:

Anatoliy V. Bezrukov, Associate Professor of the Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8511-2743>, Researcher ID: N-5459-2016, bezrukow157@yandex.ru

Nikolay I. Naumkin, Acting Head of the Chair of Basic Design of Mechanisms and Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Dr.Sci. (Ped.), Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1109-5370>, Researcher ID: L-4643-2018, naumn@yandex.ru

Vladimir F. Kupryashkin, Head of the 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/0000-0002-7512-509X>, Researcher ID: L-5153-2018, kupwf@mail.ru

Vladimir V. Kupryashkin, 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/0000-0001-5327-4089>, kupvovan@mail.ru

Contribution of the authors:

A. V. Bezrukov – analyzing academic literature and patents, conducting laboratory research, processing experimental results, preparing the initial version of the text, visualization.

N. I. Naumkin – scientific guidance, formulation of the main research concept, formation of conclusions, finalization of the text.

V. F. Kupryashkin – formulation of the main concept of research, formation of conclusions, critical analysis.

V. V. Kupryashkin – literary and patent analysis, processing of theoretical research results.

All authors have read and approved the final manuscript.



Приборное и методологическое обеспечение диагностики потребности растений в элементах питания

И. И. Гуреев

Курский ФАНЦ (г. Курск, Российская Федерация)

✉ gureev06@mail.ru

Аннотация

Введение. Минеральные удобрения, без которых невозможны интенсивные технологии производства сельскохозяйственных культур, являются дорогостоящим и экологически небезопасным ресурсом, загрязняющим почву и продукты земледелия при избыточном внесении. Поэтому использовать удобрения необходимо исходя из диагностических данных потребности растений. Цель исследования – приборное и методологическое обеспечение современной функциональной диагностики потребности растений в элементах питания, ориентированной на активизацию процесса фотосинтеза.

Материалы и методы. Предложено в процессе диагностики многочисленные промежуточные пластиковые пробирки со смесью постоянных компонентов (хлористого натрия, суспензии хлоропластов и краски Тильманса) вариантов диагностического раствора заменить эластичной единой светозащитной емкостью. Однородная смесь в единой емкости исключает ошибку концентрации компонентов раствора, сопутствующую многоазовому формированию смесей в промежуточных пробирках. Это позволило уменьшить количество однотипных операций заполнения пипеточными дозаторами промежуточных пробирок, повторяющихся для каждой смеси элементов. Исследования выполнены в 2021–2022 гг. с использованием механических пипеточных дозаторов «Ленпипет» Thermo Fisher Scientific (Финляндия) – 10 мкл, «Ленпипет Колор» – 100 мкл и «Ленпипет Колор» – 200 мкл. Погрешность их определяли на электронных весах ВК-600.

Результаты исследования. С применением инновации возросла достоверность диагностических данных вследствие уменьшения ошибки концентрации компонентов в растворе смеси в среднем на 8,6 %. Кроме того, снизились затраты времени на выполнение диагностики в 1,7 раза, что в условиях ограниченного времени жизни хлоропластов благоприятно сказалось на получении достоверных данных.

Обсуждение и заключение. Достоверные данные диагностики потребности растений в элементах питания позволят экономить удобрительные ресурсы, а также повысить качество производимой сельскохозяйственной продукции, не загрязненной избыточными элементами питания.

Ключевые слова: функциональная диагностика, достоверность, элементы питания, хлоропласты, фотохимическая активность, оптимизационная программа

Финансирование: исследование выполнено на базе ФГБНУ «Курский ФАНЦ» в рамках государственного задания № FGZU-2022-0005.



Благодарности: автор выражает признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гуреев И. И. Приборное и методологическое обеспечение диагностики потребности растений в элементах питания // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 504–519. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.504-519>

Original article

Instrumental and Methodological Support for the Diagnostics of Nutritional Requirements of Plants

I. I. Gureev

*Federal Agricultural Kursk Research Center
(Kursk, Russian Federation)*

✉ gureev06@mail.ru

Abstract

Introduction. Mineral fertilizers essential for intensive crop production technologies are an expensive and environmentally unsafe resource polluting the soil and agricultural products when applied in excess. The purpose of the research is instrumental and methodological support for modern functional diagnostics of nutritional requirements of plants, which is aimed at activating the photosynthesis process.

Materials and Methods. It is proposed, for identifying nutritional requirements of plants to replace numerous intermediate plastic test tubes with a mixture of permanent components (sodium chloride, chloroplast suspension and Tillmans' paint) for the diagnostic solution variants by a separate elastic light-protective container. A homogeneous mixture in a separate container eliminates the error in the concentration of solution components, which accompanies the repeated formation of mixtures in intermediate test tubes. This made it possible to reduce a number of repeated operations of filling intermediate test tubes with pipette dispensers for each tested mixture of elements. The studies were carried out in 2021–2022 using mechanical pipette dispensers Lenpipet Thermo Fisher Scientific (Finland) – 10 ml, Lenpipet Color – 100 μ l and Lenpipet Color – 200 μ l. Their error was determined on a VK-600 electronic balance.

Results. The use of innovation increased the reliability of diagnostic data due to a 8.6% average reduction of error in the concentration of components in the mixture solution. In addition, the time spent on performing diagnostics decreased by 1.7 times that, under the conditions of a limited lifetime of chloroplasts, had a favorable effect on obtaining reliable data.

Discussion and Conclusion. Reliable diagnostic data on nutritional requirements of plants will save fertilizer resources and improve the quality of agricultural production free from excessive nutrients.

Keywords: functional diagnostics, reliability, batteries, chloroplasts, photochemical activity, optimization program

Funding: The study was conducted at the Federal Agricultural Kursk Research Center under State Assignment No. FGZU-2022-0005.

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

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Gureev I.I. Instrumental and Methodological Support for the Diagnostics of Nutritional Requirements of Plants. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):504–519. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.504-519>

Введение

Урожай культур во многом зависит от продуктивности фитоценоза, который является не только биологической категорией, но и агрономической. В процессе вегетации культур фотосинтезом создается примерно 95 % массы сухого органического вещества урожая. Элементы же минерального питания составляют лишь около 5 % сухой массы. Но они являются средством формирования фотосинтетического аппарата, а также его адаптации к вариabельному радиационному режиму и повышают КПД активной фотосинтетической радиации (ФАР).

Потребность растений в элементах минерального питания удовлетворяют удобрениями – неотъемлемым компонентом современных интенсивных технологий производства сельскохозяйственных культур [1]. С применением удобрений урожайность в XX веке возросла более чем на 50 % [2]. Без удобрений интенсивные технологии абсолютно не конкурентоспособны.

Но удобрения – дорогостоящий и экологически небезопасный ресурс, загрязняющий почву и продукты земледелия при избыточном внесении. Дефицит удобрений, так же как и избыток, негативно сказывается на урожайности и качестве растениеводческой продукции. Весьма существенны экономические предпосылки оптимизации питания культур, так как примерно треть от всех затрат на производство продукции земледелия приходится на минеральные удобрения. Наиболее рациональное их использование возможно при научно обоснованном учете биологических особенностей возделываемых

культур и вариabельных почвенно-климатических условий [3].

Поэтому использование удобрений в адаптивном режиме сопряжено с необходимостью систематической диагностики потребности растений в широкой номенклатуре элементов минерального питания¹ [4].

Цель исследований – приборное и методологическое обеспечение современной функциональной диагностики потребности растений в элементах питания.

Обзор литературы

В земледелии систематически в течение длительного времени использовались преимущественно удобрения с макроэлементами питания (NPK). Однако, согласно закону ограничивающего фактора Ю. Либиха, для растений наиболее значим тот элемент питания, который более всего отклоняется от оптимального значения, то есть для продуктивного развития растений одинаково значимы как макро- (NPK), так и микроэлементы (медь, железо, марганец, бор, молибден, кобальт и др.).

Потребность растений в макроэлементах намного больше, чем потребность в микроэлементах. В то же время нехватка даже малого количества микроудобрений может явиться причиной заболевания растений и существенного снижения продуктивности вплоть до гибели.

Основным поставщиком микроэлементов для сельскохозяйственной отрасли являлись их запасы в почве, которые постепенно истощались. Например, в Белгородской области доля пашни с низким содержанием подвижных соединений

¹ Хорошкин А. Б. Способы повышения эффективности минерального питания сельскохозяйственных культур. Краснодар : Агромастер, 2010. 67 с.

цинка возросла до 90,3 %. Для кобальта и марганца данный показатель составил 99,3 и 38,6 % соответственно [5]. Аналогичное состояние с обеспеченностью пашни и другими микроэлементами питания. Таким образом, в условиях интенсификации земледелия актуальность научно обоснованного совместного применения макро- и микроудобрений резко возросла [6].

Сбалансированное использование макро- и микроудобрений обладает синергическими свойствами, так как не только повышает урожайность и качество производимых культур, но и способствует росту эффективности NPK [1; 7; 8]. Установлено позитивное использование микроудобрений в качестве средства против фитопатогенных грибов и бактерий [9; 10].

Практическое применение микроудобрений имеет некоторые особенности. Их крайне не целесообразно автономно заделывать в почву, так как 20–80 % действующего вещества малых доз связывается почвенно-поглощающим комплексом в недоступную растениям форму [10; 11]. Поэтому распространено предпосевное нанесение микроудобрений непосредственно на семена, увеличивающее жизнеспособность проростков, а также листовые подкормки [12]. Листья хорошо поглощают растворенные в воде малые дозы препаратов, и усвояемость микроудобрений может достигать 90 %.

Лучшие агротехнические результаты получены от использования хелатных форм микроудобрений [13]. В отличие от неорганических соединений хелаты в растворах не распадаются на агрессивные ионы и не разрушают структуры действующего вещества пестицидов. Вследствие чего возможно совмещение листовых подкормок микроудобрениями в баковых смесях с пестицидами.

Макроэлементы питания вносят в почву по результатам почвенной

диагностики, используя преимущественно балансовый метод. Последующую же корректировку и оптимизацию питания растений проводят с учетом листовой диагностики. Дефицит элементов по ее результатам устраняют в вегетационный период корневыми и листовыми подкормками, необходимыми для формирования урожая культур высокого качества [14–16].

Листовая диагностика может быть визуальной, химической и функциональной. Визуальная диагностика базируется на анализе потребности растений в элементах питания вследствие изменения цвета листьев, коэффициента отражения света и др. [17; 18]. Но внешние визуальные признаки нарушения питания отражают уже необратимые и не поддающиеся корректировке процессы в растениях, ведущие к снижению урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. Кроме того, симптомы проявляются на листьях растений для групп элементов, в которых сложно идентифицировать дефицитный элемент.

При химической диагностике лабораторным анализом оценивают состав тканей растений, но не учитывают изменяющуюся их реакцию на переменные почвенно-погодные условия. В определенные фазы вегетации требуются различные номенклатура и количество элементов питания, что обуславливает необходимость их управляемого поступления в течение всего периода жизнедеятельности растительного организма.

Перспективен метод функциональной листовой диагностики, ориентированный на активизацию процесса продуцирования урожая – фотосинтеза [19; 20]. Учитывая, что удобрения действуют не только на растения, но и на микроорганизмы почвы, оказывающие значимое влияние на развитие растений, результат биохимических

процессов в растениях и почве можно оценить лишь по реакции живых растений конкретных культур на присутствие удобрений [21; 22].

Метод функциональной диагностики отражает свойство хлоропластов растений изменять фотохимическую активность пропорционально их потребности в элементах питания [23]. Но ему присущи серьезные недостатки. Диагностирование каждого из элементов питания проводят обособленно от других компонентов питательной среды. Поэтому невозможно оценить их взаимное влияние и, соответственно, оптимальное соотношение, соблюдение которого оказывает определяющее действие на продуктивность растений и качество урожая. Дефицит или избыток каких-то элементов может нарушить усвоение растениями других элементов, что негативно сказывается на урожайности культур и состоянии почвы [2; 24].

Более того, актуальность учета синергетических последствий дополнительно возрастает при вынужденном ограничении использования элементов питания по экологическим причинам. Так, с 2021 года в Германии вступили в силу правила внесения удобрений, согласно которым в районах чувствительных к нитратам, ограничивают использование азота вопреки потребности растений [25]. Экологические ограничения на использование удобрений, очевидно, будут применяться и другими странами, в том числе и РФ.

Поэтому предложено реализовывать неограниченный резерв экономного расходования удобрительных ресурсов за счет синергии взаимодействия между элементами питания при сбалансированном их внесении. Такой подход предполагает оценку фотохимической

активности хлоропластов растений на присутствие в питательной среде не единичных элементов питания, а различных их неповторяющихся смесей. Варианты смесей заведомо подбирают в соответствии с матрицей планирования эксперимента, ориентированной на построение модели с последующей оптимизацией питательной среды цифровыми методами [26].

Характер изменения фотохимической активности исследуется посредством прибора «Аквадонис», способного в стационарных и полевых условиях оценивать потребность растений в макро- и микроэлементах для проведения корневых или листовых подкормок любых сельскохозяйственных культур². Основой прибора является фотометр (рис. 1).



Р и с. 1. Прибор «Аквадонис» для диагностики потребности растений в элементах питания
F i g. 1. The device Aquadonics for diagnosing nutritional requirements of plants

² Гуреев И. И., Нитченко Л. Б., Прущик И. А. Углубленная адаптация технологий производства зерновых культур в Центрально-Черноземном регионе. Курск : ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», 2021. 238 с.



Прибор прошел производственную проверку на сельскохозяйственных культурах Центрально-Черноземной машиноиспытательной станции, а также в 10 регионах России, Украине, Белоруссии и Казахстане. В трехлетних опытах установлено, что использование синергии взаимодействия между элементами питания позволило за счет роста урожайности и минимизации расхода удобрений повысить эффективность производства ячменя до 40 %, а озимой пшеницы до 16,4 % [27; 28].

Возможности прибора позволяют в автоматическом режиме оптимизировать обеспеченность растений элементами питания и наглядно демонстрировать уровень потребности по каждому из них.

Количественное значение фотохимической активности хлоропластов получают после засветки на фотометре раствора их суспензии в совокупности со смесями элементов питания. Для поддержания необходимых свойств выделенная суспензия хлоропластов в неизменной концентрации используется при анализах совместно с другими постоянными компонентами раствора: хлористым натрием и краской Тильманса. С фотометра считывают данные фотохимической активности хлоропластов, формализуют модель взаимосвязанного факторного пространства и оптимизируют питательную среду [29]. Избыточные элементы питания в питательной среде посредством математической обработки модели нейтрализуют коррекцией величины дефицитных элементов. Выявленный дефицит питания покрывают листовыми подкормками, компоненты которых устанавливают соотношением стандартных удобрений [24].

По известному способу диагностики каждый из вариантов различных смесей элементов питания готовится индивидуально в промежуточных

пластиковых пробирках совместно с постоянными компонентами раствора. Образцы растворов из промежуточных пробирок поочередно отбирают в кварцевую пробирку, способную пропускать ультрафиолетовое излучение, и засвечивают на фотометре. Аналогичные действия проводят последовательно со всеми неповторяющимися смесями солей в объеме диагностики [23].

Однако одним из факторов достоверности результатов функциональной диагностики является минимизация ошибки опыта. Этому способствуют одинаковые исходные условия для всех обследуемых вариантов, где постоянные компоненты раствора в кварцевой пробирке перед засветкой должны иметь однородную оптическую плотность, что достигается неизменной их концентрацией в растворе.

Но многократный отбор постоянных компонентов в каждую из промежуточных пробирок производится индивидуально пипеточными дозаторами. Они обладают собственными погрешностями, которые увеличивают вариацию исходной оптической плотности растворов в кварцевой пробирке за опыт. В результате возрастает ошибка и понижается достоверность диагностики.

Немаловажно, что фотохимическая активность живых хлоропластов после отбора проб листьев для анализа нестабильна. Она постепенно угасает до нуля в течение примерно 40 минут. Поэтому в меню фотометра предусмотрено 8 контрольных точек, размещенных с одинаковым шагом по времени выполнения диагностики, относительно которых автоматически корректируются данные по ходу анализа. Для повышения достоверности диагностических данных необходимо стремиться ускорить процесс исполнения диагностики, что достигается обоснованным сокращением количества необходимых операций в ее процедуре.

Материалы и методы

Исследования выполнены в 2021 и 2022 гг. в лаборатории севооборотов и адаптивных агротехнологий ФГБНУ «Курский ФАНЦ». Для достижения цели исследований предложен инновационный способ, исключающий необходимость в многочисленных промежуточных пробирках с операциями их заполнения (рис. 2а) [30].

Существенное отличие нового способа состоит в создании однородной концентрации раствора постоянных компонентов в эластичной светозащитной емкости, единой на всю разовую программу испытаний. В качестве светозащитной емкости используется эластичная промывалка, помещенная в светонепроницаемый мешок (рис. 2б). Из нее удобно заполнять раствором постоянных компонентов кварцевые

пробирки, индивидуальные для каждой испытываемой смеси элементов питания. Однородная смесь в единой емкости исключает ошибку концентрации компонентов, сопутствующую многофазовому формированию этой смеси в промежуточных пробирках.

Процедура диагностики по инновационному способу сводится к внесению пипеточным дозатором в кварцевую пробирку лишь неповторяющихся смесей элементов питания. Затем эти же пробирки из светозащитной емкости поочередно заполняют предварительно подготовленным однородным по содержанию постоянных компонентов раствором и засвечивают на фотометре. Для контрольных замеров кварцевую пробирку перед засветкой заполняют раствором из светозащитной емкости без добавления смеси элементов питания.



а)



б)

Р и с. 2. Операции заполнения промежуточных пробирок (а) заменены на заправку единой светозащитной емкости (б), из которой заполняется кварцевая пробирка
 F i g. 2. The process of filling intermediate test tubes (a) are replaced by filling a separate light-protective container (b), from which a quartz test tube is filled

Последовательность выполнения анализа по инновационному способу следующая.

В эластичной светозащитной емкости предварительно готовят раствор постоянных компонентов: смеси хлористого натрия 0,2 %, краски Тильманса 1 % и суспензии хлоропластов 2 % (объем должен быть не менее потребности разовой программы испытаний).

В кварцевую пробирку пипеточным дозатором вносят 100 мкл раствора неповторяющейся смеси элементов питания. Затем однородным раствором постоянных компонентов из светозащитной емкости объем раствора в кварцевой пробирке доводят до 7 мл и засвечивают на фотометре.

При выполнении одного анализа кварцевую пробирку засвечивают на фотометре 24 раза: 16 засветок с испытываемыми неповторяющимися смесями элементов питания и 8 контрольных замеров, где смеси элементов питания не используют. Суммарный объем пробирок, заполняемых из светозащитной емкости, не менее $7(16 + 8) = 168$ мл.

Показания фотометра отражают фотохимическую активность хлоропластов и являются исходными для диагностики потребности растений в элементах питания.

Результаты исследования

Диагностические действия содержат 5 последовательно выполняемых этапов [24] (рис. 3).

Для известного и инновационного способов диагностики этапы 1–3 и 5 идентичны. Различия заключаются лишь в этапе 4, ориентированном на использовании прибора «Аквадонис».

В процессе реализации данного этапа вариабельность концентрации компонентов в промежуточных пробирках по известному способу оценивали величиной ошибки, с которой компоненты дозируются пипеточными дозаторами. В промежуточных пробирках готовили растворы для засветки на фотометре с целью определения фотохимической активности хлоропластов, для чего в них посредством пипеточных дозаторов вливали растворы:

– 10 мл (10 г) хлористого натрия 0,2-процентной концентрации,



Р и с. 3. Последовательность выполнения функциональной диагностики

F i g. 3. The sequence of performing functional diagnostics

- 100 мкл (0,1 г) краски Тильманса,
- 100 мкл (0,1 г) неповторяющейся смеси солей элементов питания,
- 200 мкл (0,2 г) приготовленной суспензии хлоропластов.

Полученной в каждой из промежуточных пробирок смесью наполняли кварцевую пробирку, которую засвечивали на фотометре с последующим определением значений фотохимической активности хлоропластов.

Причина высокой вариабельности исходной оптической плотности растворов, поступающих в кварцевую пробирку, заключается в накапливающейся ошибке при их разливе по промежуточным пробиркам компонентов. Обусловлена она разнящимся объемом растворов постоянных компонентов вследствие суммарной погрешности дозаторов при заполнении промежуточных пробирок.

Для определения ошибки дозирования произведено тестирование используемых пипеточных дозаторов. Объем однородной жидкости (1 мл) эквивалентен ее весу (1 г). Учитывая, что имеющимся приборным оборудованием малые объемы через вес идентифицируются более точно, вариабельность компонентов раствора оценивали соотношением их весов.

Для тестирования использовали электронные весы ВК-600, у которых при взвешивании в диапазоне 0,5–600 г дискретность отсчета составляет 0,01 г³. Хлористый натрий по 10 мл (10 г) дозировали механическим пипеточным дозатором «Ленпипет» Thermo Fisher Scientific (Финляндия). Для дозировки раствора краски Тильманса и неповторяющихся смесей солей испытываемых элементов питания применяли дозатор «Ленпипет Колор» – 100 мкл (0,1 г). Суспензию

хлоропластов дозировали прибором «Ленпипет Колор» – 200 мкл (0,2 г).

Результаты тестирования дозаторов представлены в таблице 1.

Нижний рабочий диапазон весов ВК-600 составляет 0,5 г, что превышает вес доз 0,1 г (100 мкл) и 0,2 г (200 мкл) приборов «Ленпипет Колор». Чтобы уложиться в рабочий диапазон ВК-600, малые дозируемые веса дополняли выверенным балластным весом G произвольной, но постоянной величины. Вес G превышает нижний предел рабочего диапазона взвешивания (в данном случае $G = 10 > 0,5$ г). После замера суммы весов балластный вес G вычитали.

Например, дозу тестируемого дозатора «Ленпипет Колор» 100 разгружали на платформу ВК-600 в дополнении к весу G . Первое показание весов составило $G + 0,1$ г. При этом величину разгруженной дозы определяли разностью $(G + 0,1) - G = 0,1$ г. Затем балластный вес с первой дозой дополняли второй дозой, величину которой определяли разностью $(G + 0,1 + 0,09) - (G + 0,1) = 0,09$ г и т. д. Компоненты раствора, засвечиваемого на фотометре, распределяются по промежуточным пробиркам пипеточными дозаторами с ошибкой Δ :

$$\Delta = 100 \frac{\sigma}{\bar{x}}, \% \quad (1)$$

где \bar{x} , σ – соответственно среднее арифметическое значение и среднеквадратическое отклонение веса доз компонентов при формировании смеси в растворе, г. Пропорционально весу компонентов изменяется их концентрация в растворе. При выборке доз n показатели x , σ определяли по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ г,}$$

³ URL: <https://www.medcomp.ru/catalog/product/vesy-laboratornye-massa-k-vk-600/> (дата обращения: 20.07.2022).

Тестирование стандартных пипеточных дозаторов
Testing standard pipettes

Компоненты раствора / Solution components	Хлористый натрий 0,2-процентной концентрации / Sodium chloride 0.2 per cent concentration	Краска Тильманса 1-процентной концентрации, смесь солей испытываемых элементов питания / 1 per cent Tillmans paint, a mixture of salts of the tested nutrients	Суспензия хлоропластов 2-процентной концентрации / 2 per cent suspension of chloroplasts
Нормируемая доза раствора, г / Normalized dose of solution, g	10	0,1	0,2
Марка дозатора / Dispenser brand	«Ленпипет» Thermo Fisher Scientific, 10 мл / Lenpipet Thermo Fisher Scientific, 10 ml	«Ленпипет Колор», 100 мкл / Lenpipet Color, 100 µl	«Ленпипет Колор», 200 мкл / Lenpipet Color, 200 µl
1	9,97	0,10	0,20
2	9,93	0,09	0,20
3	9,87	0,09	0,21
4	9,96	0,10	0,20
5	9,83	0,08	0,18
6	9,92	0,09	0,20
7	9,91	0,11	0,19
8	9,95	0,08	0,21
9	9,86	0,09	0,19
Выборка доз, г / Sample of doses, g	10	0,10	0,19
11	9,98	0,09	0,19
12	10,06	0,09	0,18
13	9,98	0,15	0,20
14	9,98	0,15	0,19
15	10,04	0,13	0,19
16	10,04	0,09	0,19
17	10,05	0,10	0,21
18	9,99	0,10	0,19
19	9,98	0,08	0,19
20	10,05	0,09	0,19
Среднее арифметическое значение, г / Arithmetic average, g	9,96	0,10	0,19
Среднеквадратическое отклонение, ±г / Standard deviation, ±g	0,0661	0,0205	0,0089
Ошибка, % / Error, %	0,7	20,5	4,6

$$\sigma = \pm\sqrt{s^2}, \text{ г,}$$

где s^2 – дисперсия отклонения концентрации компонентов в смеси от среднего арифметического, г^2 :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \text{ г}^2.$$

По инновационному способу кварцевая пробирка заполняется раствором из светозащитной емкости, содержащей однородную для всех испытаний концентрацию постоянных компонентов, то есть вариабельность концентрации данного раствора для всех испытаний стремится к нулю.

Анализ таблицы 1 показывает, что рассчитанная по формуле (1) ошибка тестируемых дозаторов возрастает с уменьшением доз и составляет 0,7; 4,6 и 20,5 %.

При формировании известным способом раствора смеси постоянных

компонентов общая ошибка их концентрации определяется косвенным путем по результатам прямых измерений каждого из компонентов. Точность опыта для суммы компонентов в растворе заключена между наибольшими и наименьшими значениями слагаемых. Практически берут среднюю арифметическую величину ошибки, которая для данного случая составляет 8,6 %⁴. Инновационный способ формирования однородной концентрации компонентов раствора предотвращает эту ошибку и тем самым повышает достоверность диагностики [30].

Кроме того, устранение ряда операций процедуры диагностики по новому способу ускоряет ее, что в условиях ограниченного времени жизни хлоропластов благоприятно сказывается на получении достоверных данных. Для сравнительной оценки затрат времени на исполнение диагностики сравниваемыми способами возникла необходимость их хронометража (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Хронометраж затрат времени на выполнение этапа диагностики с использованием прибора «Аквадонис», мин
Analyzing the time spent on the implementation of the diagnostic stage using the device Aquadonis, min

№	Наименование приема / Name of reception	Повторности / Repetitions					
		Известный способ / Known method			Инновационный способ / Innovative method		
		1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Наполнение пластиковых пробирок хлористым натрием 0,2-процентной концентрации (24 шт. по 10 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет» Thermo Fisher Scientific, 10 мл / Filling plastic test tubes with 0.2 per cent sodium chloride (24 pcs of 10 ml). It is used the pipette dispenser Lenpipet Thermo Fisher Scientific, 10 ml	5,11	5,07	5,33	0	0	0

⁴ Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. М. : Колос, 1973. 199 с.

Окончание таблицы 2 / End of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Внесение в пластиковые пробирки раствора краски Тильманса 1-процентной концентрации (24 шт. по 0,1 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 100 мкл / Adding 1 per cent Tillmans paint solution (24 pcs of 0.1 ml) into plastic test tubes. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 100 μ l	4,25	4,09	3,90	0	0	0
3	Внесение в пластиковые пробирки раствора смеси солей испытываемых элементов питания (16 штук по 0,1 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 100 мкл / Adding a solution of a mixture of salts of the tested nutrients (16 pcs of 0.1 ml) into plastic test tubes. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 100 μ l	3,36	3,50	3,17	0	0	0
4	Промывка дистиллированной водой пипеточного дозатора после каждого внесения смеси испытываемых элементов питания (16 раз) / Rinsing the pipette dispenser with distilled water after each addition of the mixture of tested nutrients (16 times)	4,48	4,21	4,36	0	0	0
5	Внесение в пластиковые пробирки суспензии хлоропластов 2-процентной концентрации (16 шт. по 0,2 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 200 мкл / Adding 2 per cent suspension of chloroplasts (16 pcs of 0.2 ml) into plastic test tubes. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 200 μ l	5,32	5,46	5,37	0	0	0
6	Перемешивание раствора в каждой из 16 шт. пластиковых пробирок осторожными вращательными движениями / Mixing the solution in each of the 16 plastic test tubes with gentle rotational movements	3,11	3,03	2,84	0	0	0
7	Наполнение раствором кварцевой пробирки из 16 пластиковых пробирок / Filling a quartz test tube with a solution from 16 plastic test tubes	3,25	3,51	3,40	0	0	0
8	Засвечивание кварцевой пробирки на фотометре, 16 шт. / Illuminating a quartz test tube with a photometer, 16 pcs	0,53	0,51	0,50	0,52	0,52	0,53
9	Опорожнение кварцевой пробирки и промывка ее дистиллированной водой, 16 шт. / Emptying the quartz test tube and washing it with distilled water, 16 pcs	0,32	0,31	0,34	0,33	0,30	0,34
10	Формирование в единой светозащитной емкости раствора постоянных компонентов (смеси хлористого натрия 0,2 %, краски Тильманса 1 % и суспензии хлоропластов 2 %) / Forming a solution of permanent components (a mixture of 0.2 per cent sodium chloride, 1 per cent Tillmans paint and 2 per cent suspension of chloroplasts in a separate light-protective container	0	0	0	9,15	9,37	9,18
11	Внесение в кварцевую пробирку раствора смеси солей испытываемых элементов питания (16 шт. по 0,1 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 100 мкл / Adding a solution of a mixture of salts of the tested nutrients (16 pcs of 0.1 ml) into a quartz test tube. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 100 μ l	0	0	0	3,06	2,92	2,96
12	Заполнение кварцевой пробирки раствором постоянных компонентов из единой светозащитной емкости, 16 шт. / Filling a quartz tube with a solution of permanent components from a single light-protective container, 16 pcs	0	0	0	4,12	3,94	3,87
Всего / Total:		29,73	29,69	29,21	17,18	17,05	16,88
Среднее / Average:		29,5 \pm 0,29		17,04 \pm 0,15			

По результатам выполненного хронометража затраты времени на исполнение диагностики по известному способу составили 29,5 мин, а с применением инновации они сократились до 17,04 мин.

Обсуждение и заключение

Изложенное приборное и методологическое обеспечение функциональной диагностики потребности растений в элементах питания обеспечивает в среднем снижение на 8,6 % ошибки в получении диагностических данных. Кроме того, в 1,7 раза сокращаются затраты времени и, соответственно, труда на выполнение диагностических процедур вследствие отсутствия необходимости обособленного распределения по промежуточным пробиркам

постоянных компонентов раствора. Это позволяет ускорить обследование отобранных листьев в наиболее активной жизненной фазе хлоропластов и дополнительно способствует минимизации ошибки в испытаниях. Следствием практического использования инновации является более экономное расходование удобрительных ресурсов, а также улучшение качества производимой сельскохозяйственной продукции, не загрязненной избыточными элементами питания. Учитывая, что некоторые из элементов питания являются тяжелыми металлами, точное дозирование их, в соответствии с потребностями растений, обеспечивает экологический эффект в виде щадящего химического воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Revisiting Fertilizers and Fertilization Strategies for Improved Nutrient Uptake by Plants / P. S. Bindraban [et al.] // *Biology and Fertility of Soils*. 2015. Vol. 51, Issue 8. P. 897–911. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>
2. Krasilnikov P., Taboada M. A., Amanullah. Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability [Электронный ресурс] // *Agriculture*. 2022. Vol. 12, Issue 4. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
3. Gonova O. V., Malygin A. A. Economic and Mathematical Methods and Their Practical Application in Agrochemical Experiment [Электронный ресурс] // *Journal of Agriculture and Environment*. 2021. Vol. 1, Issue 17. doi: <https://doi.org/10.23649/jae.2021.1.17.6>
4. Nanotechnologies for Increasing the Crop Use Efficiency of Fertilizer-Micronutrients / C. M. Monreal [et al.] // *Biology and Fertility of Soils*. 2016. Vol. 52, Issue 3. P. 423–437. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1073-5>
5. Lukin S. V., Zhuikov D. V. Content and Balance of Trace Elements (CO, MN, ZN) in Agroecosystems of the Central Chernozemic Region Russia [Электронный ресурс] // *Agriculture*. 2022. Vol. 12, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020154>
6. Assessing the Impact of Soil Degradation on Food Production / P. S. Bindraban [et al.] // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2012. Vol. 4, Issue 5. P. 478–488. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.015>
7. Improving Yield and Nitrogen Use Efficiency through Alternative Fertilization Options for Rice in China: A Meta-Analysis / W. Ding [et al.] // *Field Crops Research*. 2018. Vol. 227. P. 11–18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.001>
8. Use of a Colloidal Solution of Metal and Metal Oxide-Containing Nanoparticles as Fertilizer Soybean Productivity / L. Batsmanova [et al.] // *Journal of Central European Agriculture*. 2020. Vol. 21, Issue 2. P. 311–319. doi: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2414>
9. Plant-Mediated Synthesis of Nanoparticles and Their Antimicrobial Activity against Phytopathogens / J. A. Hernández-Díaz [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 101, Issue 4. P. 1270–1287. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10767>
10. Ingle A. P., Gupta I. Role of Metal-Based Nanoparticles in Plant Protection // *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts*; Ed. by A. P. Ingle. John Wiley & Sons Ltd., 2021. P. 220–238. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch11>

11. Feed the Crop Not the Soil: Rethinking Phosphorus Management in the Food Chain / P. J. A. Withers [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 28, Issue 12. P. 6523–6530. doi: <https://doi.org/10.1021/es501670j>
12. Iodine Bio Fortification of Wheat, Rice and Maize through Fertilizer Strategy / I. Cakmak [et al.] // *Plant and Soil*. 2017. Vol. 418, Issue 1–2. P. 319–335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3295-9>
13. Spraying High Concentrations of Chelated Zinc Enhances Zinc Biofortification in Wheat Grain / M. Xu [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 102, Issue 9. P. 3590–3598. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11705>
14. Беляев Н. Н., Дубинкина Е. А. Продуктивность сортов озимой пшеницы в зависимости от применения микроудобрения Аквадон-Микро // *Земледелие*. 2013. № 6. С. 45–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20446189> (дата обращения: 20.07.2022).
15. Цыганков В. И. Влияние удобрения Акварин 5 на урожайность и качество озимой пшеницы // *Земледелие*. 2007. № 6. С. 21. URL: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/6-2007> (дата обращения: 20.07.2022).
16. Лазарев В. И., Золотарева И. А., Шершнева О. М. Способы применения микробиологических препаратов Гуапсин и Трихофит на озимой пшенице // *Земледелие*. 2014. № 2. С. 23–24. URL: <https://clck.ru/32VFav> (дата обращения: 20.07.2022).
17. Sharifi A. Remotely Sensed Vegetation Indices for Crop Nutrition Mapping // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. Vol. 100, Issue 14. P. 5191–5196. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10568>
18. Modern Imaging Techniques in Plant Nutrition Analysis: a Review [Электронный ресурс] / D. Li [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105459>
19. Photosynthesis of Winter Effectively Reflected Multiple Physiological Responses under Short-Term Drought-Rewatering Conditions / Q. Mu [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 102, Issue 6. P. 2472–2483. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11587>
20. Effects of Potassium Deficiency on Photosynthesis, Chloroplast Ultrastructure, ROS, and Antioxidant Activities in Maize (*Zea Mays* L.) / Q. Du [et al.] // *Journal of Integrative Agriculture*. 2019. Vol. 18, Issue 2. P. 395–406. doi: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61953-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61953-7)
21. Федотов Г. Н., Шалаев В. С., Батырев Ю. П. Микроорганизмы почв и стимуляторы прорастания семян // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2019. Т. 11, № 1. С. 47–64. doi: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2019-11-1-47-64>
22. Meta-Analysis Approach to Assess the Effects of Soil Tillage and Fertilization Source under Different Cropping Systems / M. Allam [et al.] // *Agriculture*. 2021. Vol. 11, Issue 9. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11090823>
23. Способ обеспечения растений минеральными элементами : патент 952168 СССР / Плешков А. С., Ягодин Б. А. № 2970658/30-15 ; заявл. 31.07.1980 ; опубл. 23.08.1982. 4 с.
24. Абдуазимов А. М., Вафоева М. Б. Влияние суспензии различного компонента на биохимический состав листа озимой пшеницы // *Life Sciences and Agriculture*. 2020. Т. 2, № 2. С. 82–85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43790945> (дата обращения: 20.07.2022).
25. Pahmeyer C., Kuhn T., Britz W. ‘Fruchtfolge’: a Crop Rotation Decision Support System for Optimizing Cropping Choices with Big Data and Spatially Explicit Modeling [Электронный ресурс] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105948>
26. Способ диагностики потребности растений в минеральных элементах питания : патент 2541310 Российская Федерация / Гуреев И. И. Опубл. 10.02.2015.
27. Гуреев И. И., Жердев М. Н., Брежнев А. Л. Технологии выращивания ячменя с использованием микроэлементных удобрений и регуляторов роста // *Земледелие*. 2015. № 3. С. 34–36. URL: <https://clck.ru/32VHA3> (дата обращения: 20.07.2022).
28. Гуреев И. И., Жердев М. Н., Брежнев А. Л. Совершенствование агротехнологии выращивания озимой пшеницы с использованием удобрений, содержащих микроэлементы // *Земледелие*. 2016. № 8. С. 25–28. URL: <https://clck.ru/32VHCP> (дата обращения: 20.07.2022).
29. Программа для оптимизации питания растений по данным функциональной листовой диагностики : свидетельство о регистрации программы № 2021617738 / Гуреев И. И. Опубл. 19.05.2021.

30. Способ листовой диагностики потребности растений в минеральных элементах питания : патент 2780843 Российская Федерация / Гуреев И. И. Опубл. 04.10.2022.

Поступила 27.07.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 17.10.2022

Об авторе:

Гуреев Иван Иванович, заведующий лабораторией Курского ФАНЦ (305021, Российская Федерация, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 706), доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>, gureev06@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bindraban P.S., Dimkpa C., Nagarajan L., et al. Revisiting Fertilizers and Fertilization Strategies for Improved Nutrient Uptake by Plants. *Biology and Fertility of Soils*. 2015;51(8):897–911. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>
2. Krasilnikov P., Taboada M.A., Amanullah. Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability. *Agriculture*. 2022;12(4). doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
3. Gonova O.V., Malygin A.A. Economic and Mathematical Methods and Their Practical Application in Agrochemical Experiment. *Journal of Agriculture and Environment*. 2021;1(17). doi: <https://doi.org/10.23649/jae.2021.1.17.6>
4. Monreal C.M., DeRosa M., Mallubhotla S.C., et al. Nanotechnologies for Increasing the Crop Use Efficiency of Fertilizer-Micronutrients. *Biology and Fertility of Soils*. 2016;52(3):423–437. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1073-5>
5. Lukin S.V., Zhuikov D.V. Content and Balance of Trace Elements (CO, MN, ZN) in Agroecosystems of the Central Chernozemic Region Russia. *Agriculture*. 2022;12(2). doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020154>
6. Bindraban P.S., der Velde M., Ye L., et al. Assessing the Impact of Soil Degradation on Food Production. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2012;4(5):478–488. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.015>
7. Ding W., Xu X., He P., et al. Improving Yield and Nitrogen Use Efficiency through Alternative Fertilization Options for Rice in China: A Meta-Analysis. *Field Crops Research*. 2018;227:11–18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.001>
8. Batsmanova L., Taran N., Konotop Ye., et al. Use of a Colloidal Solution of Metal and Metal Oxide-Containing Nanoparticles as Fertilizer Soybean Productivity. *Journal of Central European Agriculture*. 2020;21(2):311–319. doi: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2414>
9. Hernández-Díaz J.A., Garza-García J.J., Zamudio-Ojeda A., et al. Plant-Mediated Synthesis of Nanoparticles and Their Antimicrobial Activity against Phytopathogens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(4):1270–1287. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10767>
10. Ingle A.P., Gupta I. Role of Metal-Based Nanoparticles in Plant Protection. In: A.P. Ingle (ed.). *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts*. John Wiley & Sons Ltd.; 2021. p. 220–238. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch11>
11. Withers P.J.A., Sylvester-Bradley R., Jones D.L., et al. Feed the Crop Not the Soil: Rethinking Phosphorus Management in the Food Chain. *Environmental Science & Technology*. 2014;28(12):6523–6530. doi: <https://doi.org/10.1021/es501670j>
12. Cakmak I., Prom-u-thai C., Guilherme L.R.G., et al. Iodine Bio Fortification of Wheat, Rice and Maize through Fertilizer Strategy. *Plant and Soil*. 2017;418(1–2):319–335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3295-9>
13. Xu M., Liu M., Si L., et al. Spraying High Concentrations of Chelated Zinc Enhances Zinc Biofortification in Wheat Grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;102(9):3590–3598. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11705>

14. Belyaev N.N., Dubinkina Ye.A. Productivity of Varieties of Winter Wheat Depending on Application of Microfertilizer Akvadon-Mikro. *Zemledelie*. 2013;(6):45–47. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20446189> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Tsygankov V.I. [Effect of Aquarine 5 Fertilizer on Yield and Quality of Winter Wheat]. *Zemledelie*. 2007;(6):21. Available at: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/6-2007> (accessed 20.07.2022). (In Russ.)
16. Lazarev V.I., Zolotareva I.A., Shershneva O.M. Methods of Application of Microbiological Guapsin and Trikhofit Preparations on Winter Wheat. *Zemledelie*. 2014;(2):23–24. Available at: <https://clck.ru/32VFav> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Sharifi A. Remotely Sensed Vegetation Indices for Crop Nutrition Mapping. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020;100(14):5191–5196. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10568>
18. Li D., Li C., Yao Y., et al. Modern Imaging Techniques in Plant Nutrition Analysis: a Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105459>
19. Mu Q., Mengqi D., Xu J., et al. Photosynthesis of Winter Effectively Reflected Multiple Physiological Responses under Short-Term Drought-Rewatering Conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;102(6):2472–2483. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11587>
20. Du Q., Zhao X., Xia L., et al. Effects of Potassium Deficiency on Photosynthesis, Chloroplast Ultrastructure, ROS, and Antioxidant Activities in Maize (*Zea Mays* L.). *Journal of Integrative Agriculture*. 2019;18(2):395–406. doi: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61953-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61953-7)
21. Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Y.P. Soil Microorganisms and Stimulants of Seed Germination. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2019;11(1):47–64. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2019-11-1-47-64>
22. Allam M., Radicetti E., Petroselli V., Mancinelli R. Meta-Analysis Approach to Assess the Effects of Soil Tillage and Fertilization Source under Different Cropping Systems. *Agriculture*. 2021;11(9). doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11090823>
23. Pleshkov A.S., Yagodin B.A. [The Way of Providing Plants with Mineral Elements]. Patent 952,168 USSR. 1982 August 23. 4 p. (In Russ.)
24. Abduazimov A.M., Vafoeva M.B. Influence of North Root Feeding on the Content of Chlorophyll in the Composition of Winter Wheat Leaves. *Life Sciences and Agriculture*. 2020;2(2):82–85. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43790945> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Pahmeyer C., Kuhn T., Britz W. ‘Fruchtfolge’: a Crop Rotation Decision Support System for Optimizing Cropping Choices with Big Data and Spatially Explicit Modeling. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105948>
26. Gureev I.I. [A Way to Diagnose the Plants’ Need for Mineral Nutrients]. Patent 2,541,310 Russian Federation. 2015 February 10. (In Russ.)
27. Gureev I.I., Zherdev M.N., Brezhnev A.L. Barley Cultivation Technologies by Application of Micronutrient Fertilizers and Phytihormones. *Zemledelie*. 2015;(3):34–36. Available at: <https://clck.ru/32VHA3> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
28. Gureev I.I., Zherdev M.N., Brezhnev A.L. Improvement of Agrotechologies of Winter Wheat Cultivation with the Use of Fertilizers, Containing Minor-Nutrient Elements. *Zemledelie*. 2016;(8):25–28. Available at: <https://clck.ru/32VHCP> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
29. Gureev I.I. [Program for Optimizing Plant Nutrition Based on Functional Leaf Diagnostics Data]. Registration Certificate No. 2021617738. 2021 May 19. (In Russ.)
30. Gureev I.I. [A Method of Leaf Diagnostics of Plant Needs for Mineral Nutrients]. Patent 2,780,843 Russian Federation. 2022 October 4. (In Russ.)

Submitted 27.07.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 17.10.2022

About the author:

Ivan I. Gureev, Laboratory Manager, Federal Agricultural Kursk Research Center (70b Karl Marks St., 305021 Kursk, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>, gureev06@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 62-82:629.083

doi: 10.15507/2658-4123.032.202204.520-538

Научная статья



Определение номинальных значений размеров и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники

П. А. Ионов, П. В. Сенин, С. В. Пьянзов , Н. В. Раков,
А. М. Земсков

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

 serega.pyanzov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Без технической (конструкторской) документации разработка и адаптация отечественных технологий, направленных на техническое обслуживание и ремонт зарубежной техники, не представляется возможной. В качестве объекта исследования выбран наиболее распространенный зарубежный объемный гидропривод Sauer-Danfoss серии 90, состоящий из гидронасоса 90R100 и гидромотора 90M100. Цель исследования – определить номинальные значения размеров и допускаемые отклонения деталей в ресурсолимитирующих соединениях объемного гидропривода зарубежного производства.

Материалы и методы. Первая серия стендовых испытаний посвящена поиску диапазонов изменения значимых факторов, оказывающих влияние на объемный КПД. Вторая серия – получению регрессионных моделей и определению методом круглого восхождения значений износа деталей и зазоров в ресурсолимитирующих соединениях объемного гидропривода Sauer-Danfoss, соответствующих величине объемного КПД нового агрегата. Номинальные значения размеров и допускаемые отклонения деталей в соединениях гидропривода определяли методом размерного анализа.

Результаты исследования. Стендовые испытания позволили определить диапазоны изменения износов деталей и зазоров в соединениях объемных гидроприводов, влияющих на объемный КПД. Предложен и реализован комплексный подход к определению номинальных размеров и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники, включающий комбинацию экспериментальных исследований (стендовые испытания) и метода размерного анализа. Для нового объемного гидропривода Sauer-Danfoss серии 90 получены следующие значения: диаметр отверстия в блоке цилиндров под поршень $22,7^{+0,006}$ мм; диаметр поршня $22,7_{-0,004}$ мм; диаметр отверстия в задней крышке под золотник $9,5^{+0,004}$ мм; диаметр золотника $9,5_{-0,0025}$ мм.

© Ионов П. А., Сенин П. В., Пьянзов С. В., Раков Н. В., Земсков А. М., 2022



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



Обсуждение и заключение. Определены номинальные значения размеров и допускаемые отклонения деталей, а также величины технологических зазоров в ресурсолимитирующих соединениях нового объемного гидропривода Sauer-Danfoss серии 90. Полученные результаты являются основой для разработки технологии восстановления работоспособности и повышения долговечности агрегатов объемного гидропривода зарубежного производства.

Ключевые слова: объемный гидропривод, стендовые испытания, коэффициент полезного действия, критерий предельного состояния, ресурсолимитирующее соединение, регрессионная модель, размерная цепь

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Определение номинальных значений размеров и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 520–538. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.520-538>

Original article

Determination of Nominal Dimensions and Permissible Variations in Dimensions of Critical Parts of Foreign Machinery Units

P. A. Ionov, P. V. Senin, S. V. Pyanzov , N. V. Rakov, A. M. Zemskov

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

 serega.pyanzov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Developing and adapting domestic technologies aimed at the maintenance and repair of foreign equipment is impossible without design documentation. The object of the study was the volumetric hydraulic drive Sauer-Danfoss of 90 series consisting of a hydraulic pump 90R100 and a hydraulic motor 90M100. The purpose of the study is to determine the nominal dimensions and permissible variations in dimensions of critical parts that affect efficiency of the foreign hydraulic drive.

Materials and Methods. The first series of bench tests was devoted to finding the ranges of variation of significant factors influencing the volumetric efficiency. In the second series, there were constructed regression models and by using the steepest ascend method, there were determined the values of critical parts wear and clearances in the critical parts connections affecting efficiency of the hydraulic drive Sauer-Danfoss. The nominal values of dimensions and permissible variations in dimensions of the hydraulic drive critical parts were determined by the dimensional analysis method.

Results. The bench tests made it possible to determine the ranges of changes in critical parts wear and clearances in the critical parts connections of volumetric hydraulic drives that affect the volumetric efficiency. There has been proposed and implemented a comprehensive approach to determining the nominal dimensions and permissible variations in dimensions of critical parts of foreign equipment units. This approach suggests a combination of experimental studies (bench tests) and the method of dimensional analysis. For the new volumetric hydraulic drive Sauer-Danfoss series 90 the following values are received: diameter of a hole in the cylinder block under the piston $22.7^{+0.006}$ mm, piston diameter $22.7_{-0.004}$ mm, diameter of a hole in the rear cover under the spool $9.5^{+0.004}$ mm, spool diameter $9.5_{-0.0025}$ mm.

Discussion and Conclusion. There have been determined the nominal values of dimensions, permissible variations in dimensions of critical parts, and the values of technological clearances in the critical parts connections of the new volumetric hydraulic drive Sauer-Danfoss series 90 that affect its efficiency. The results obtained are the basis for the development of technology to restore the efficiency and increase the durability of the volumetric hydraulic drive units of foreign origin.

Keywords: volumetric hydraulic drive, bench tests, efficiency factor, limit state criterion, regression model, dimensional chain

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

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

For citation: Ionov P.A., Senin P.V., Pyanzov S.V., et al. Determination of Nominal Dimensions and Permissible Variations in Dimensions of Critical Parts of Foreign Machinery Units. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):520–538. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.520-538>

Введение

В период 2005–2015 гг. Российская Федерация активно закупала энергонасыщенную и высокопроизводительную технику зарубежного производства. В гарантийный период эксплуатации, в среднем 3–5 лет, проблемы с техническим обслуживанием и ремонтом вышедшей из строя техники решали дилерские центры производителей. По истечении гарантийного периода с техническим обслуживанием и ремонтом возникали сложности. Дилерские центры частично решают обозначенную проблему: осуществляют замену (продажу) новых агрегатов или необходимых запасных частей за большую стоимость. Однако в большинстве случаев, не имея достаточных финансовых средств, проблему технического обслуживания и ремонта в постгарантийный период решали собственными силами и средствами эксплуатирующих организаций.

Введение в 2014–2022 гг. санкций привело к существенному сокращению импорта новых агрегатов и запасных частей для технического обслуживания и ремонта. Из-за этого большинство дилерских центров закрылось. Это серьезно обострило ситуацию с техническим обслуживанием и ремонтом зарубежной

техники. Выход видится в разработке новых технологий технического обслуживания и ремонта зарубежной техники или адаптации существующих отечественных технологий. Однако без технической (конструкторской) документации, являющейся коммерческой тайной заводов-изготовителей, решить данную задачу невозможно. Поэтому актуальным является исследование, направленное на определение номинальных значений размеров и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники.

Одной из наиболее сложных и дорогостоящих систем в современной энергонасыщенной зарубежной технике является привод ходовой части, включающий в свое конструктивное исполнение сложные аксиально-поршневые гидроагрегаты: гидронасос и гидромотор. Данные гидроагрегаты образуют единую замкнутую систему – объемный гидропривод, от технического состояния которого во многом зависят надежность и эксплуатационные показатели техники.

По результатам проведенных ранее исследований установлены наиболее распространенные в РФ модели объемных гидроприводов: ОАО «Пневмостроймашина», Россия, и Hydrosila,

Украина, (модели ГСТ-90, ГСТ-112 и PVH/MFH-112) – 65,7 %; Sauer-Danfoss, Германия, – 24,5 % (90R100 и 90M100); Eaton, США, – 3,4 % (6423-618 и 6433-113); Linde, Германия, – 5,4 % (BMV 70R и BMF75); Bosch Rexroth, Германия, – 0,99 % (AA4VG90 и A2FM90)¹.

Объемный гидропривод PVH/MFH-112 компании Hydrosila является отечественным аналогом объемного гидропривода ГСТ-90, -112 производства ОАО «Пневмостроймашина». Данные гидроприводы детально изучены, есть конструкторская документация, известны технологические зазоры в ответственных соединениях, определены причины потери их работоспособности, разработаны технологические рекомендации по их диагностированию, техническому обслуживанию и ремонту².

В настоящее время интерес для исследования представляют зарубежные объемные гидроприводы. Мало данных о причинах потери их работоспособности, они существенно отличаются в конструктивном исполнении отдельных деталей и соединений. Наиболее распространенным зарубежным производителем в РФ является компания Sauer-Danfoss с объемным гидроприводом серии 90 (гидронасос марки 90R100 и гидромотор 90M100)³. Этот гидропривод выбран в качестве объекта исследований.

Цель исследования – определить номинальные значения размеров и допускаемые отклонения деталей в ре-

сурсолимитирующих соединениях объемного гидропривода зарубежного производства.

Обзор литературы

Объемный гидропривод компании Sauer-Danfoss серии 90 нашел широкое применение в конструкциях отечественной и зарубежной техники сельскохозяйственного (Acros 530, 580; Torum 740; RSM-161; RSM-1401)⁴ [1], дорожно-строительного (Volvo Construction G-900; Ammann AV 70X; Case 885 B AWD; Doosan DX255NLC-5) [2–6] и коммунального (JCB 4CX ECO; МКСМ-800; Nilfisk City Ranger 3500; ПУМ-5021) назначения [7–13].

Критерием предельного состояния (критерием оценки работоспособности) объемного гидропривода является снижение величины объемного КПД ($\eta_{об}$) гидронасоса/гидромотора на номинальных режимах работы более чем на 20 % от нормативного (паспортного) значения⁵ [1–4].

В исследованиях отмечено, что ресурсолимитирующими соединениями, вносящими значительный вклад в снижение величины объемного КПД гидроприводов ГСТ Hydrosila, являются «поршень – втулка»; «золотник – корпус», «распределитель 1 – распределитель 2» гидронасоса/гидромотора объемного гидропривода. Для восстановления работоспособности данных гидроприводов существует технология ремонта⁶. Восстановить изношенные детали аналогичных соединений зарубежных объемных гидроприводов,

¹ Пьянзов С. В. Совершенствование стенда и методики для контроля технического состояния объемных гидроприводов сельскохозяйственной техники : дис. ... канд. тех. наук. Саранск, 2021. 318 с.

² Там же ; Галин Д. А. Оценка работоспособности и повышение долговечности объемного гидропривода ГСТ-90 : дис. ... канд. тех. наук. Саранск, 2007. 224 с. ; Земсков А. М. Технология повышения долговечности объемного гидропривода (на примере ГСТ-112) : дис. ... канд. тех. наук. Саранск, 2014. 295 с.

³ Пьянзов С. В. Совершенствование стенда и методики...

⁴ Там же ; Галин Д. А. Оценка работоспособности и повышение долговечности... ; Земсков А. М. Технология повышения долговечности...

⁵ Там же.

⁶ Там же.

например Sauer-Danfoss, не представляется возможным, прежде всего, из-за отсутствия данных о номинальных конструкторских размерах и допускаемых отклонениях деталей и значениях технологических зазоров в соединениях.

В настоящее время для определения размеров ответственных деталей в машиностроении используют два подхода: статистический и расчетно-аналитический.

Статистический подход позволяет определить среднее значение размеров деталей и допускаемых отклонений в исследуемых соединениях агрегата на основании сбора, обработки и анализа большой выборки новых деталей. Определение количества деталей для проведения исследований осуществляют с доверительной вероятностью 0,80–0,95⁷. Достоинство данного метода заключается в высокой точности получаемых результатов [14; 15]. Недостаток метода – в сложности его реализации, связанной с необходимостью большого количества новых исследуемых деталей [16–19].

Расчетно-аналитический подход основан на методе размерного анализа деталей путем построения и решения размерных цепей соединения. В качестве достоинства авторы отмечают простоту, наглядность и доступность данного метода без применения сложного математического аппарата и 100-процентную вероятность попадания допусков исследуемых деталей в заданные пределы [20–22].

Недостаток метода обусловлен необходимостью наличия некоторого количества исходных данных для расчета. Например, при отсутствии величин зазоров в соединениях объемного гидропривода определить номинальные размеры и допускаемые

отклонения исследуемых деталей данным методом невозможно.

Таким образом, можно сделать вывод, что ни один из существующих методов не позволяет достигнуть заявленную цель. Поэтому предлагается применить комплексный подход – комбинацию экспериментальных исследований (стендовые испытания) и метода размерного анализа. Стендовые испытания нового объемного гидропривода Sauer-Danfoss позволят установить величины зазоров в соединениях, а размерный анализ достоверно определить значения номинальных размеров и допускаемых отклонений деталей ресурсолимитирующих соединений.

Материалы и методы

Контроль технического состояния объемного гидропривода Sauer-Danfoss проводят по наиболее важным параметрам диагностирования: подача/расход рабочей жидкости, рабочее давление, крутящий момент, температура рабочей жидкости и КПД (полный, гидромеханический и объемный). При этом величина объемного КПД является критерием оценки работоспособности диагностируемого объекта.

Объемные КПД отдельных гидроагрегатов (гидронасоса $\eta_{об.пр.}^H$ / гидромотора $\eta_{об.пр.}^M$) объемного гидропривода определяются исходя из следующих выражений:

$$\eta_{об.пр.}^H = (\eta_{об.нов.}^H - 0,2 \cdot \eta_{об.нов.}^H) = (0,95 - 0,2 \cdot 0,95) = 0,76, \quad (1)$$

$$\eta_{об.пр.}^M = (\eta_{об.нов.}^M - 0,2 \cdot \eta_{об.нов.}^M) = (0,95 - 0,2 \cdot 0,95) = 0,76, \quad (2)$$

где $\eta_{об.нов.}^H = 0,95$ – объемный КПД нового гидронасоса; $\eta_{об.нов.}^M = 0,95$ – объемный КПД нового гидромотора.

Таким образом, падение объемного КПД ниже предельного значения ($\eta_{об.пр.} = 0,76$) говорит о том, что

⁷ Пьянзов С. В. Совершенствование стенда и методики...

объемный гидропривод непригоден к дальнейшей эксплуатации вследствие больших утечек рабочей жидкости из-за износов деталей и увеличения зазоров в его соединениях.

Для определения влияния на работоспособность (величину объемного КПД) объемного гидропривода значенный износ деталей и зазоров в соединениях проводили серию стендовых испытаний на специализированном стенде с гидравлическим нагружающим устройством, разработанным в рамках реализации программы «У.М.Н.И.К.» (Фонд содействия инновациям, проект № 0038566, № гос. рег. 12454ГУ/2017)⁸. Параметры диагностирования испытуемых объемных гидроприводов контролировали с помощью разработанного специализированного программного обеспечения (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614369) в режиме реального времени. Контролируемые параметры сравнивали с регламентированными, установленными заводами-изготовителями.

Стендовые испытания разделили на две группы. Первая группа включала в себя однофакторные (пассивные) эксперименты. Вторая группа – многофакторные (активные) эксперименты.

Однофакторный эксперимент проводили для трех значимых соединений объемных гидроприводов Hydrosila и Sauer-Danfoss. Первый этап посвящен влиянию на объемный КПД зазора в соединении «поршень – втулка». Эксперимент начинали от технологического (минимального по конструкторской документации) зазора $z = 25$ мкм для нового объемного гидропривода Hydrosila с шагом 10–15 мкм до падения величины КПД ниже предельного значения. Увеличения зазора добивались механической обработкой рабочих

поверхностей поршней. Для объемного гидропривода Sauer-Danfoss значение технологических зазоров неизвестно, поэтому принимали минимальные значения, полученные перекомпоновкой новых деталей, $z = 10$ мкм. Величины зазоров и износы деталей в других соединениях испытуемых объемных гидроприводов принимались постоянными, равными минимальным значениям, полученным перекомпоновкой новых деталей или соответствующим шероховатости их поверхностей.

Второй этап посвящен влиянию на объемный КПД зазора в соединении «золотник – корпус». Эксперимент начинали от минимального технологического зазора $z = 8$ мкм для нового объемного гидропривода Hydrosila с шагом 4–15 мкм до падения величины КПД ниже предельного значения. Увеличения зазора добивались механической обработкой рабочих поверхностей золотников. Для объемного гидропривода Sauer-Danfoss значение технологических зазоров неизвестно, поэтому принимали минимальные значения, полученные перекомпоновкой новых деталей, $z = 4$ мкм. При этом износы в соединениях «распределитель 1 – распределитель 2» (Hydrosila) и «блок с напайкой – распределитель» (Sauer-Danfoss) испытуемых объемных гидроприводов принимались постоянными, равными минимальным значениям, соответствующим шероховатости поверхностей новых деталей. Зазоры в соединениях «поршень – втулка» (Hydrosila и Sauer-Danfoss) соответствуют минимальным значениям, полученным перекомпоновкой новых деталей.

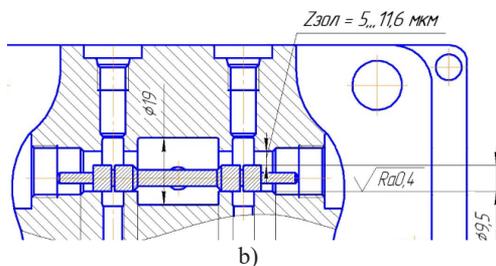
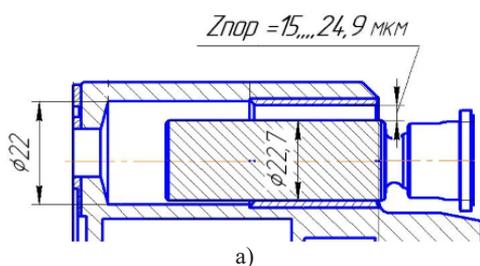
Третий этап посвящен влиянию суммарной площади износа в соединении «блок с напайкой – распределитель» (Sauer-Danfoss) и «распределитель 1 –

⁸ Там же.

распределитель 2» (Hydrosila) на объемный КПД гидронасоса. Площади износов распределителей определяли по профилограммам, полученным с использованием профилографа-профилометра «Тэйлор Хобсон»⁹.

Во второй группе стендовых испытаний проводили многофакторный эксперимент по методике, представленной в других работах¹⁰. Цель эксперимента заключалась в получении регрессионных моделей влияния значимых факторов на параметр оптимизации – объемный КПД при номинальных значениях рабочего давления. Определение значений износа деталей и зазоров в ресурсолимитирующих соединениях зарубежного объемного гидропривода Sauer-Danfoss, соответствующих величинам объемного КПД нового гидропривода 0,95 и 0,98, проводили оптимизацией регрессионных моделей методом крутого восхождения¹¹.

На основе найденных значений зазоров выполнили расчет номинальных размеров и допусковых отклонений деталей ресурсолимитирующих соединений методом размерного анализа [16–22].

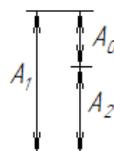


Р и с. 1. Схемы ресурсолимитирующих соединений объемного гидропривода Sauer-Danfoss: а) соединение «поршень – втулка» гидропривода Sauer-Danfoss; б) соединение «золотник – корпус» гидропривода Sauer-Danfoss

F i g. 1. Schemes of critical parts connections that affect efficiency of the volumetric hydraulic drive Sauer-Danfoss: а) connection “piston – sleeve” in the hydraulic drive Sauer-Danfoss; б) connection “spool – case” in the hydraulic drive Sauer-Danfoss

Схемы ресурсолимитирующих соединений объемного гидропривода Sauer-Danfoss представлены на рисунке 1.

Данные соединения однотипные, состоят из двух составляющих звеньев и замыкающего звена (см. рис. 2).



Р и с. 2. Общая схема размерной цепи соединений: A_1 – диаметр отверстия в корпусной детали (блоках цилиндров, задней крышке); A_2 – диаметр вала (поршня или золотника)

F i g. 2. General scheme of the dimensional chain of connections: A_1 – diameter of the hole in the body part (cylinder blocks, back cover); A_2 – diameter of the shaft (piston or spool)

В рассматриваемых размерных цепях известны предельные значения замыкающих и номинальные размеры составляющих звеньев, следовательно, решалась прямая задача размерной цепи. При этом использовали метод полной взаимозаменяемости и способ расчета максимума-минимума, чтобы требуемая точность зазоров в соединениях

⁹ Земсков А. М. Технология повышения долговечности...

¹⁰ Там же ; Пьянзов С. В. Совершенствование стенда и методики...

¹¹ Земсков А. М. Технология повышения долговечности...

обеспечивалась при самых неблагоприятных сочетаниях составляющих звеньев без каких-либо дополнительных операций в виде подбора или пригонки.

Расчет звеньев проводился на основании РД 50-635-87 в следующей последовательности:

1. Определили нижнее $A_{0н}$ и верхнее $A_{0в}$ предельные отклонения замыкающих звеньев.

2. Нашли координаты середины $A_{0с}$ полей допусков замыкающих звеньев согласно следующему выражению:

$$A_{0с} = \frac{A_{0н} + A_{0в}}{2}. \quad (3)$$

3. Далее определили поля допусков замыкающих звеньев T_0 :

$$T_0 = A_{0в} - A_{0н}. \quad (4)$$

4. Нашли среднее число единиц допуска составляющих звеньев α_c :

$$\alpha_c = \frac{T_0}{i_{31} + i_{32}}. \quad (5)$$

где i_{31} и i_{32} – единица допуска составляющих звеньев по ГОСТ 25347-82¹².

5. По полученным значениям α_c определяем качества составляющих звеньев, назначаем основные отклонения по ГОСТу¹³. Далее проводили проверочный расчет.

6. Определили допуск замыкающего звена с учетом принятых составляющих звеньев $T_0^{проб}$:

$$T_0^{проб} = T_1 + T_2. \quad (6)$$

где T_1 и T_2 – допуски звенов 1 и 2.

7. Назначения допусков проверяли исходя из выполнения условия:

$$T_0 \geq T_0^{проб}.$$

Расчет размерных цепей с корректирующими звеньями проводился в следующей последовательности.

8. Если проверочные условия не выполняются, то прибегают к решению размерных цепей с корректирующими звеньями, расчет включал в себя следующие шаги:

– в качестве корректирующих звеньев назначались звенья $A_{2кор}$;

– определяли допуск корректирующего звена $T_{2кор}$:

$$T_{2кор} = T_0 + T_1. \quad (7)$$

– по полученным значениям допусков назначались качества корректирующих звеньев и величины предельных отклонений (основные отклонения звеньев прежние);

– находили допуск замыкающих звеньев с учетом допусков корректирующих звеньев $T_{0кор}^{проб}$:

$$T_{0кор}^{проб} = T_1 + T_{2кор}. \quad (8)$$

– проверяли правильность назначения допусков с учетом корректирующих звеньев.

Результаты исследования

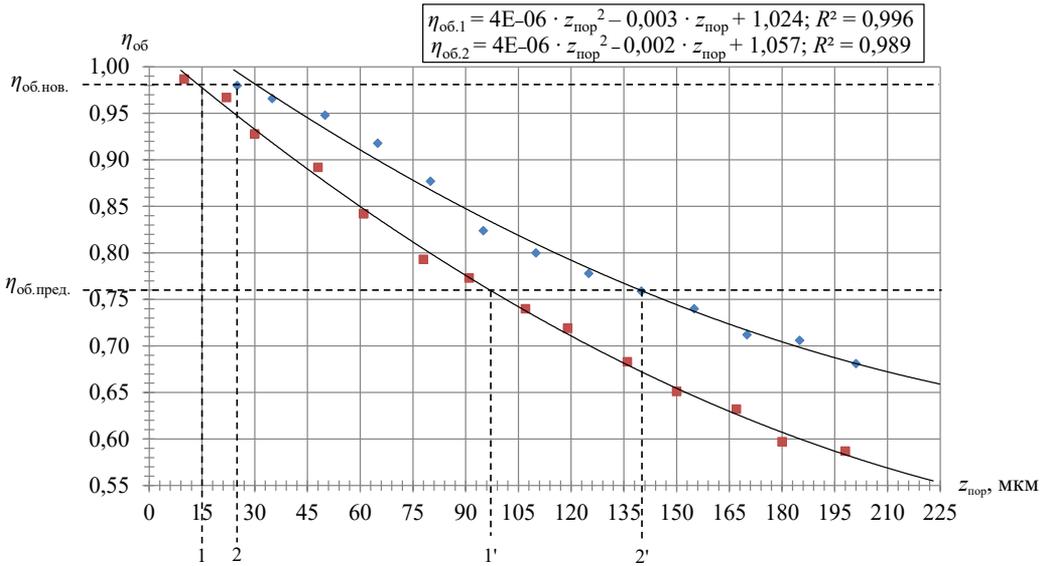
Результаты первой группы стендовых испытаний объемных гидроприводов представлены на рисунках 3–5.

На рисунке 3 представлено изменение величины объемного КПД $\eta_{об}$ для зарубежных объемных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila от зазоров в соединении «поршень – втулка».

Анализируя рисунок, можно сделать вывод, что при максимальном значении величины объемного КПД $\eta_{об.нов.}$ величина зазора в соединении «поршень – втулка» для объемных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila составляет $z_{пор.нов.1} = 15$ мкм

¹² ГОСТ 25347-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки. М. : ИПК Издательство стандартов, 1982. 54 с.

¹³ Там же.



Р и с. 3. Изменение объемного КПД $\eta_{об}$ от зазора в соединении «поршень – втулка» $z_{пор}$; $\eta_{об.нов.}$ – максимальное значение объемного КПД при минимальном технологическом зазоре в соединении нового гидропривода Hydrosila; 0,76 – предельное значение объемного КПД; 1 – зазор, соответствующий $\eta_{об.нов.}$ для гидропривода Sauer-Danfoss ($z_{пор.нов.1} = 15$ МКМ); 2 – зазор, соответствующий $\eta_{об.нов.}$ для гидропривода Hydrosila ($z_{пор.нов.2} = 25$ МКМ); 1' – зазор, соответствующий $\eta_{об.пред.}$ для гидропривода Sauer-Danfoss ($z_{пор.пред.1'} = 97$ МКМ); 2' – зазор, соответствующий $\eta_{об.пред.}$ для гидропривода Hydrosila ($z_{пор.пред.2'} = 140$ МКМ)

Fig. 3. Change in the volumetric efficiency caused by a clearance in the connection “piston – sleeve” $z_{пор}$; $\eta_{об.нов.}$ – maximum value of volumetric efficiency with a minimum technological clearance in the connection of the new hydraulic drive Hydrosila; 0.76 – limit value of volumetric efficiency; 1 – clearance corresponding to $\eta_{об.нов.}$ for hydraulic drive Sauer-Danfoss ($z_{пор.нов.1} = 15$ μ m); 2 – clearance corresponding to $\eta_{об.нов.}$ for hydraulic drive Hydrosila ($z_{пор.нов.2} = 25$ μ m); 1' – clearance corresponding to $\eta_{об.пред.}$ for hydraulic drive Sauer-Danfoss ($z_{пор.пред.1'} = 97$ μ m); 2' – clearance corresponding to $\eta_{об.пред.}$ for hydraulic drive Hydrosila ($z_{пор.пред.2'} = 140$ μ m)

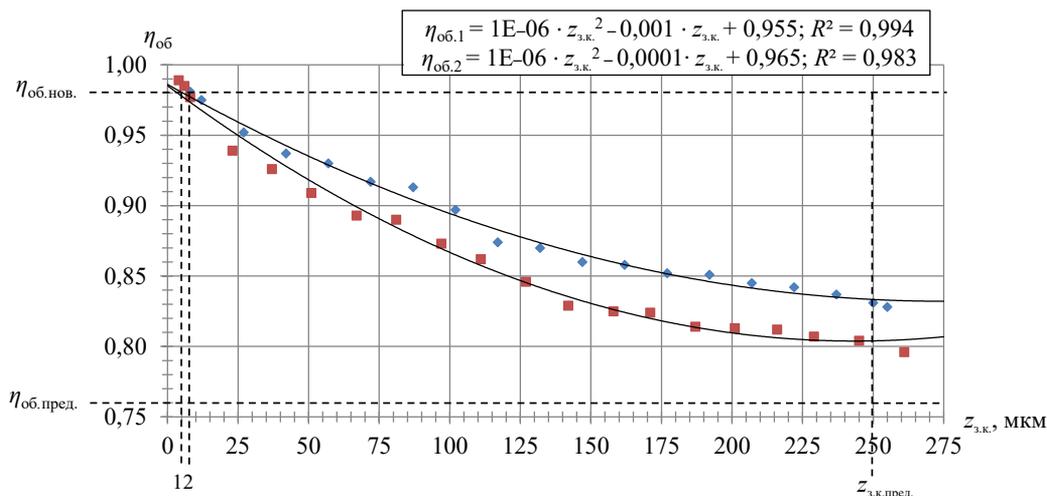
и $z_{пор.нов.2} = 25$ мкм соответственно. Предельное значение величины объемного КПД объемных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila наблюдается при следующих величинах зазора: $z_{пор.пред.1'} = 97$ мкм и $z_{пор.пред.2'} = 140$ мкм соответственно.

На рисунке 4 представлено изменение величины объемного КПД $\eta_{об}$ для зарубежных объемных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila от зазоров в соединении «золотник – корпус».

Анализируя рисунок, можно сделать вывод, что при максимальном значении величины объемного КПД $\eta_{об.нов.}$ величина зазора в соединении

«золотник – корпус» для объемных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila составляет $z_{з.к.нов.1} = 5$ мкм и $z_{з.к.нов.2} = 8$ мкм соответственно. Предельное значение величины объемного КПД объемных гидроприводов Sauer-Danfoss, Hydrosila не наблюдается, поэтому для исследуемых объемных гидроприводов принимаем предельное значение величины зазора в соединении $z_{з.к.пред.} = 250$ мкм.

На рисунке 5 представлено изменение величины объемного КПД $\eta_{об}$ для зарубежных объемных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila от суммарной площади износа в соединениях.



Р и с. 4. Изменение объемного КПД $\eta_{об}$ от зазора в соединениях «золотник – корпус» $z_{з.к.}$: $\eta_{об.нов.}$ – максимальное значение объемного КПД при минимальном технологическом зазоре в соединении нового гидропривода Hydrosila; 0,76 – предельное значение объемного КПД;

1 – зазор, соответствующий $\eta_{об.нов.}$ для гидропривода Sauer-Danfoss ($z_{з.к.нов.1} = 5$ мкм);

2 – зазор, соответствующий $\eta_{об.нов.}$ для гидропривода Hydrosila ($z_{з.к.нов.2} = 8$ мкм);

$z_{з.к.пред.}$ – предельное значение зазора в соединениях $z_{з.к.пред.} = 250$ мкм

Fig. 4. Change in the volumetric efficiency caused by the clearance in the critical parts connections “spool – housing” $z_{з.к.}$: $\eta_{об.нов.}$ – maximum value of volumetric efficiency with a minimum technological gap in the connection of the new hydraulic drive Hydrosila; 0.76 – limit value of volumetric efficiency;

1 – clearance corresponding to $\eta_{об.нов.}$ for hydraulic drive Sauer-Danfoss ($z_{з.к.нов.1} = 5$ μm);

2 – clearance corresponding to $\eta_{об.нов.}$ for hydraulic drive Hydrosila ($z_{з.к.нов.2} = 8$ μm);

$z_{з.к.пред.}$ – limit value of the clearance in the connections $z_{з.к.пред.} = 250$ μm

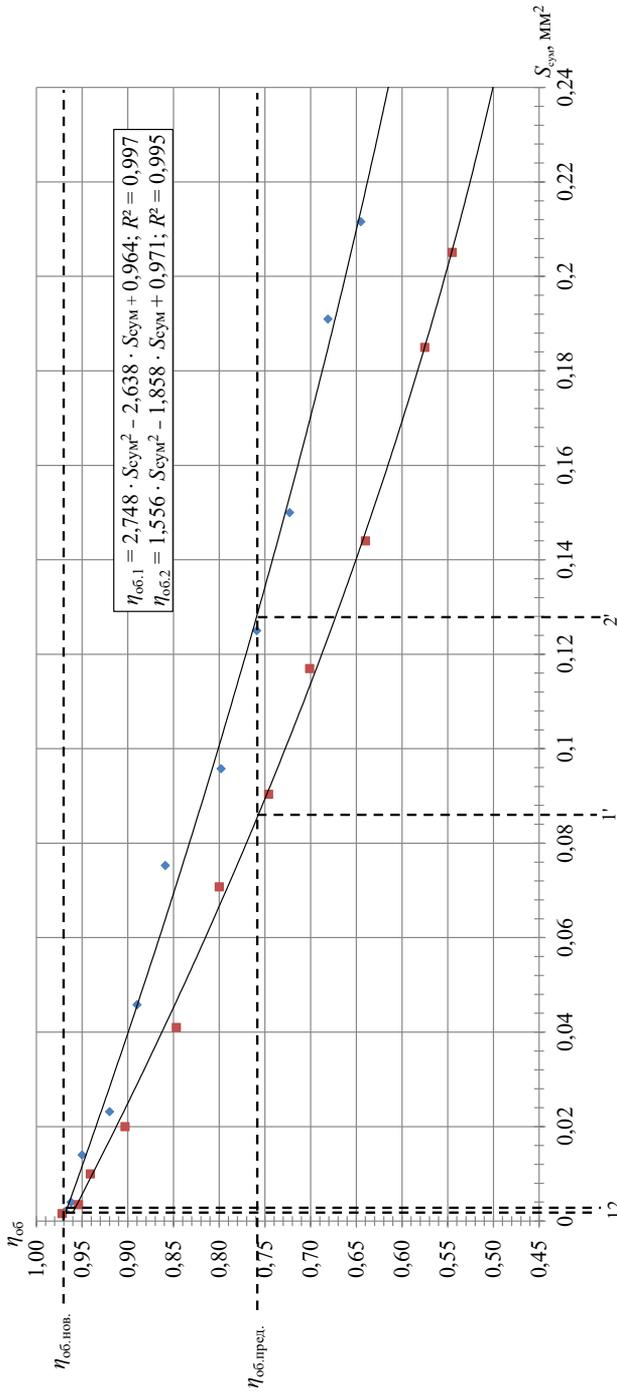
Анализируя рисунок, можно сделать вывод, что то при максимальном значении величины объемного КПД $\eta_{об.нов.}$ величина суммарной площади износа в соединении «блок с напайкой – распределитель» (Sauer-Danfoss) и «распределитель 1 – распределитель 2» (Hydrosila) составляет $S_{сум1} = 0,001$ мм² и $S_{сум2} = 0,002$ мм² соответственно. Предельное значение величины объемного КПД объемных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila наблюдается при следующих величинах суммарной площади износа: $S_{сум.пред.1'} = 0,086$ мм² и $S_{сум.пред.2'} = 0,128$ мм² соответственно.

Следует отметить, что с увеличением износов и зазоров в соединениях для всех гидроприводов происходит резкое падение величины объемного КПД.

Наибольшее падение объемного КПД наблюдается у объемного гидропривода Sauer-Danfoss. По нашему мнению, это связано с величиной рабочего давления в линиях объемного гидропривода: чем выше давление, тем интенсивнее происходит утечка рабочей жидкости и в результате наблюдается резкое падение объемного КПД гидроагрегата.

Проведенные эксперименты позволили определить диапазоны изменения зазоров для дальнейших исследований.

По результатам многофакторного эксперимента получены регрессионные модели, описывающие связь объемного КПД зарубежных гидроприводов Sauer-Danfoss и Hydrosila с износами деталей и зазорами в соединениях:



Р и с. 5. Изменение объемного КПД $\eta_{об}$ от суммарной площади износа в соединении «блок с напайкой – распределитель» и «распределитель 1 – распределитель 2»; $S_{сум}$: $\eta_{об.нов.}$ – максимальное значение объемного КПД при минимальной площади износа в соединении нового гидропривода Hydrosila; 0,76 – предельное значение объемного КПД; 1 – суммарная площадь износа, соответствующая $\eta_{об.нов.}$ для гидропривода Sauer-Danfoss ($S_{сум} = 0,001 \text{ мм}^2$); 2 – суммарная площадь износа, соответствующая $\eta_{об.нов.}$ для гидропривода Hydrosila ($S_{сум} = 0,002 \text{ мм}^2$); 1' – суммарная площадь, соответствующая $\eta_{об.пред.}$ для гидропривода Sauer-Danfoss ($S_{сум.пред.1'} = 0,086 \text{ мм}^2$); 2' – суммарная площадь износа, соответствующая $\eta_{об.пред.}$ для гидропривода Hydrosila ($S_{сум.пред.2'} = 0,128 \text{ мм}^2$)

F i g. 5. Change in volumetric efficiency caused by the total area of wear in the connection “block with solder – distributor” and “distributor 1 – distributor 2”; $S_{сум}$: $\eta_{об.нов.}$ – maximum value of volumetric efficiency with a minimum wear area in the connection of the new hydraulic drive Hydrosila; 0,76 – limit value of volumetric efficiency; 1 – total wear area corresponding $\eta_{об.нов.}$ for hydraulic drive Sauer-Danfoss ($S_{сум} = 0,001 \text{ mm}^2$); 2 – total wear area corresponding $\eta_{об.нов.}$ for hydraulic drive Hydrosila ($S_{сум} = 0,002 \text{ mm}^2$); 1' – total wear area corresponding $\eta_{об.пред.}$ for hydraulic drive Sauer-Danfoss ($S_{сум.пред.1'} = 0,086 \text{ mm}^2$); 2' – total wear area corresponding $\eta_{об.пред.}$ for hydraulic drive Hydrosila ($S_{сум.пред.2'} = 0,128 \text{ mm}^2$)

– для Hydrosila:

$$\eta_{об.1} = 1,0326 - 1,5742 \cdot S_{сум} - 1,165 \cdot 10^{-3} \cdot z_{пор} - 5 \cdot 10^{-4} \cdot z_{з.к.} - 5,29 \cdot 10^{-3} \cdot S_{сум} \cdot z_{пор}, \quad (9)$$

– для Sauer-Danfoss:

$$\eta_{об.2} = 1,0186 - 2,5948 \cdot S_{сум} - 2,267 \cdot 10^{-3} \cdot z_{пор} - 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot z_{з.к.} - 7,41 \cdot 10^{-3} \cdot S_{сум} \cdot z_{пор}. \quad (10)$$

Адекватность полученных регрессионных моделей проверяли по критерию Фишера. При значимости $q = 5\%$ и степени свободы $N_{1,ад} = 3$ и $N_{2,ад} = 16$ получено критическое значение $F_{кр} = 3,24$ (согласно методике, изложенной в РДМУ 109-77). Расчетное значение критерия Фишера для объемных гидроприводов Hydrosila и Sauer-Danfoss составило: $F_1 = 3,103$ ($F_1 = 3,103 < F_{кр} = 3,24$) и $F_2 = 2,931$ ($F_2 = 2,931 < F_{кр} = 3,24$) соответственно. Так как расчетное значение меньше критического, гипотеза об адекватности полученных моделей принимается. Таким образом, полученные регрессионные модели адекватно описывают взаимосвязь факторов с объемным КПД.

Установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на объемный КПД гидропривода Sauer-Danfoss, являются: суммарная площадь износа $S_{сум}$ в соединении «блок с напайкой – распределитель»; зазор в соединении «поршень – втулка» $z_{пор}$; зазор в соединении «золотник – корпус» $z_{з.к.}$ и комбинация факторов: суммарная площадь износа в соединении «блок с напайкой – распределитель» и зазор в соединении «поршень – втулка». Данные соединения объемного гидропривода являются ресурсолимитирующими.

Для определения соответствия величин объемного КПД значениям износа деталей и зазоров в соединениях зарубежных гидроприводов Hydrosila и Sauer-Danfoss проводили оптимизацию регрессионных моделей (9) и (10) методом крутого восхождения. Результаты оптимизации представлены в таблицах 1, 2.

Результаты оптимизации регрессионной модели для объемного гидропривода Hydrosila показали, что значения КПД $\eta_{об} = 0,95$ соответствуют верхним технологическим зазорам в соединениях, а КПД $\eta_{об} = 0,98$ – нижним технологическим зазорам. Полученные результаты коррелируют с конструкторской

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Результаты оптимизации регрессионной модели (9) для объемного гидропривода Hydrosila
Results of regression model optimization (9) for volumetric hydraulic drive Hydrosila

Параметр / Parameter	$S_{сум}, \text{мм}^2 /$ $S_{сум}, \mu\text{м}^2$	$z_{пор}, \text{мкм} /$ $z_{пор}, \mu\text{м}$	$z_{з.к.}, \text{мкм} /$ $z_{з.к.}, \mu\text{м}$	Объемный КПД $\eta_{об} /$ Volumetric efficiency $\eta_{об}$
b_i	-1,57420	-0,001656	-0,0005	–
$b_i \mathcal{U}$	-0,09917	-0,095220	-0,0605	–
l	0,00001	0,300000	0,1400	–
Опыты на линии восхождения / Experiments on the line of ascent				
1	0,00200	25,0	8,00	0,983787
2	0,00201	25,3	8,14	0,983200
...
57	0,00256	41,8	15,84	0,950863
58	0,00257	42,1	15,98	0,950274
59	0,00258	42,4	16,12	0,949685

документацией и паспортными данными, установленными заводом-изготовителем, что подтверждает достоверность полученных результатов¹⁴.

Применив данный подход к объемному гидроприводу Sauer-Danfoss, определим верхние (максимальные при КПД $\eta_{об} = 0,95$) и нижние (минимальные при КПД $\eta_{об} = 0,98$) технологические зазоры в ресурсолимитирующих соединениях.

Результаты оптимизации позволили получить номинальные значения минимальных износов и технологических зазоров в соединениях нового объемного гидропривода Sauer-Danfoss ($S_{сум} = 0,001 \text{ мм}^2$, $z_{пор} = 15 \text{ мкм}$ и $z_{з.к.} = 5 \text{ мкм}$ при $\eta_{об} = 0,97$) и максимальных износов и технологических зазоров при $\eta_{об} = 0,95$ ($S_{сум} = 0,00166 \text{ мм}^2$, $z_{пор} = 24,9 \text{ мкм}$ и $z_{з.к.} = 11,6 \text{ мкм}$).

Полученные результаты являются исходными данными для расчета номинальных значений размеров и допускаемых отклонений деталей ресурсолимитирующих соединений объемного гидропривода Sauer-Danfoss.

Для суммарной площади износа соединения «блок с напайкой – распределитель» объемного гидропривода Sauer-Danfoss в качестве максимального технологического зазора между плоскими стенками принимается значение, равное суммарному отклонению от плоскостности для рассматриваемых поверхностей деталей. Данное значение соответствует величине суммарной шероховатости зоны уплотнения соединения и составляет 0,2 мкм.

Результаты расчетов по соединениям $z_{пор}$ и $z_{з.к.}$ объемного гидропривода Sauer-Danfoss приведены в таблице 3.

Методом размерного анализа установлены номинальные значения размеров и допускаемые отклонения деталей в ресурсолимитирующих соединениях для нового объемного гидропривода Sauer-Danfoss серии 90:

- диаметр отверстия в блоке цилиндров под поршень $22,7^{+0,006} \text{ мм}$;
- диаметр поршня $22,7_{-0,004} \text{ мм}$;
- диаметр отверстия в задней крышке под золотник $9,5^{+0,004} \text{ мм}$;
- диаметр золотника $9,5_{-0,0025} \text{ мм}$.

Т а б л и ц а 2

Table 2

Результаты оптимизации регрессионной модели (10) для объемного гидропривода Sauer-Danfoss
Results of regression model optimization (10) for volumetric hydraulic drive Sauer-Danfoss

Параметр / Parameter	$S_{сум}$, мм ² / $S_{сум}$, μm	$z_{пор}$, мкм / $z_{пор}$, μm	$z_{з.к.}$, мкм / $z_{з.к.}$, μm	Объемный КПД $\eta_{об}$ / Volumetric efficiency $\eta_{об}$
b_i	-2,59480	-0,002267	-0,00063	–
$b_i \mathcal{U}$	-0,11027	-0,092947	-0,07717	–
l	0,00002	0,300000	0,20000	–
Опыты на линии восхождения / Experiments on the line of ascent				
1	0,00100	15,0	5,0	0,978726
2	0,00102	15,3	5,2	0,977864
...
33	0,00164	24,6	11,4	0,951082
34	0,00166	24,9	11,6	0,950217
35	0,00168	25,2	11,8	0,949352

¹⁴ Пьянзов С. В. Совершенствование стенда и методики...

Результаты расчета размерных цепей способом максимума-минимума
Results of calculation of dimensional chains by the maximum-minimum method

Этапы / Stages	Обозначение параметра / Parameter designation	Лимитирующие соединения / Limiting connections	
		$Z_{\text{пор}}$	$Z_{\text{з.к.}}$
1	$A_{0н}, \text{ мкм} / A_{0н}, \mu\text{м}$	15	5
	$A_{0в}, \text{ мкм} / A_{0в}, \mu\text{м}$	25	12
2	$A_{0с}, \text{ мкм} / A_{0с}, \mu\text{м}$	20	8,5
3	$T_0, \text{ мкм} / T_0, \mu\text{м}$	10	8
4	i_3	1,31	0,90
	α_c	3,82	3,89
5	IT (квалитет) / IT (accuracy degree)	4	4
	T_1 и $T_2, \text{ мкм} / T_1$ and $T_2, \mu\text{м}$	6	4
	Основное отклонение звена A_1 / Main deviation links A_1	22,7H	9,5H
	Основное отклонение звена A_2 / Main deviation links A_2	22,7h	9,5h
	Поле допуска звена $A_1, \text{ мм} /$ Tolerance field links $A_1, \text{ mm}$	22,7 ^{+0,006}	9,5 ^{+0,004}
	Поле допуска звена $A_2, \text{ мм} /$ Tolerance field links $A_2, \text{ mm}$	22,7 _{-0,006}	9,5 _{-0,004}
	Проверочный расчет / Verification calculation		
6	$T_0^{\text{пров}}, \text{ мкм} / T_0^{\text{пров}}, \mu\text{м}$	12	8
7	Проверка условия / Condition testing	10 < 12	7 < 8
		Не выполняется / The condition is not met	Не выполняется / The condition is not met
8	Расчет размерных цепей с корректирующими звеньями $A_{2\text{кор}}$ / Calculation of dimensional chains with corrective links $A_{2\text{кор}}$		
	Расчетное значение $T_{2\text{кор}}, \text{ мкм} /$ Calculated value $T_{2\text{кор}}, \mu\text{м}$	4	3
	IT (квалитет) / IT (accuracy degree)	3	3
	Принятое значение $T_{2\text{кор}}, \text{ мкм} /$ Accepted value $T_{2\text{кор}}, \mu\text{м}$	4	2,5
	Поле допуска звена $A_{2\text{кор}}, \text{ мм} /$ Tolerance field links $A_{2\text{кор}}, \text{ mm}$	22,7 _{-0,004}	9,5 _{-0,0025}
	$T_{0\text{кор}}^{\text{пров}}, \text{ мкм} / T_{0\text{кор}}^{\text{пров}}, \mu\text{м}$	10	6,5
	Проверка условия / Condition testing	10 = 10	7 > 6,5
	Выполняется / The condition is met	Выполняется / The condition is met	

Таким образом, в работе предложен и реализован комплексный подход к определению номинальных размеров

и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники, включающий комбинацию

экспериментальных исследований (стендовые испытания) и метода раз-
мерного анализа.

Обсуждение и заключение

Поставленная цель достигнута. Проведенные исследования позво-
лили определить номинальные зна-
чения размеров и допускаемые от-
клонения деталей, а также величины

технологических зазоров в ресурсо-
лимитирующих соединениях нового
зарубежного объемного гидропривода
Sauer-Danfoss серии 90. Полученные
результаты являются основой для раз-
работки технологии восстановления
работоспособности и повышения дол-
говечности агрегатов объемного гидро-
привода зарубежного производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ding H., Liu Y., Zhao Ya. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load-Sensing Synchronous Control // *Measurement and Control*. 2020. Vol. 53, Issue 1–2. P. 119–125. doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
2. Method for Determining the Optimal Operating Time before Replacement of High-Pressure Hoses of Hydraulic Drives of Transport and Technological Machines [Электронный ресурс] / А. И. Павлов [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042065>
3. Rylyakin E. G., Semov I. N., Kukharev O. N. The Influence of the Oxidative Polymerization Processes on the Energy Consumption Due to Friction in the Resource Defining Hydraulic Couplings Hydraulic Drive Mate // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2019. Vol. 49, Issue 1. P. 1064–1069. URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10\(1\)%5B138%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10(1)%5B138%5D.pdf) (дата обращения: 03.08.2022).
4. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines [Электронный ресурс] / А. И. Павлов [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>
5. Повышение уровня технического обслуживания энергонасыщенной техники / Ю. В. Катаев [и др.] // *Техника и оборудование для села*. 2022. № 4. С. 27–31. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-4-27-31>
6. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation / М. N. Kostomakhin [et al.] // *Russian Engineering Research*. 2022. Vol. 42, Issue 4. P. 360–364. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X22040189>
7. New Method for Monitoring the Residual Life of High Pressure Hoses [Электронный ресурс] / А. И. Павлов [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042082>
8. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump / L. Shi [et al.] // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 153. P. 1455–1464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>
9. Разработка программного обеспечения стенда для контроля технического состояния объемных гидроприводов / С. В. Пьянзов [и др.] // *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31, № 4. С. 500–517. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>
10. Разработка мобильного контрольно-диагностического устройства / Д. А. Жданко [и др.] // *Технический сервис машин*. 2021. № 1. С. 34–44. doi: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-1-34-44>
11. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019. Vol. 99. P. 34–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>
12. Модернизация стенда КИ-28097М-03 для оценки качества ремонта регулируемых гидроагрегатов / И. М. Макаркин [и др.] // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2021. № 9. С. 36–41. doi: <https://doi.org/10.33920/sel-10-2109-05>

13. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks [Электронный ресурс] / E. V. Pestryakov [et al.] // Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics III. CSDEIS 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies ; Hu Z., Gavriushin S., Petoukhov S., He M. (eds). Vol 121. Cham : Springer, 2022. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9

14. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов / П. В. Чумаков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 426–447. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>

15. Величко С. А., Мартынова Е. Г., Иванов В. И. Оценка предельного состояния тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 448–463. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>

16. Размерный анализ технологических процессов восстановления деталей машин / Ю. А. Харламов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 5. С. 37–47. doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-5-37-47>

17. Польский Е. А., Сорокин С. В. Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6. С. 38–48. doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-6-38-48>

18. Фролов В. В. Проектный расчет размерных цепей на основе имитационного моделирования // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2019. № 2. С. 76–88. doi: <https://doi.org/10.24411/2079-7958-2019-13709>

19. Хвощевская Л. Ф., Журавлев Д. А. Анализ точности изделий машиностроения для случая параллельно связанных линейных размерных цепей // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1. С. 48–56. doi: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-48-56>

20. Бейлин А. Б., Царфин Б. А. Исследование и расчет связанных размерных цепей на примере обеспечения показателей точности поворотного делительного стола // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22, № 3. С. 5–11. doi: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-5-11>

21. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E. Design of High Precision Machining Part Processes in Free Abrasives // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 247. P. 157–167. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_17

22. Определение параметров точности механической обработки детали методом графов на основании размерных связей / Э. В. Митин [и др.] // Вестник машиностроения. 2022. № 6. С. 65–71. doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-6-65-71>

Поступила 24.10.2022; одобрена после рецензирования 21.11.2022; принята к публикации 28.11.2022

Об авторах:

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

Сенин Петр Васильевич, первый проректор 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

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

Раков Николай Викторович, 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/0000-0003-3687-9371>, Researcher ID: ABF-2838-2020, nikolaymgu@yandex.ru

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

Заявленный вклад авторов:

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

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

С. В. Пьянзов – анализ литературных данных, подготовка текста с последующей доработкой, проведение и описание экспериментальных исследований, оптимизация регрессионных моделей, обработка полученных результатов исследования.

Н. В. Раков – анализ литературных данных, расчет допусков и предельных отклонений деталей ресурсолимитирующих соединений.

А. М. Земсков – проведение экспериментальных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Ding H., Liu Y., Zhao Ya. A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load-Sensing Synchronous Control. *Measurement and Control*. 2020;53(1–2):119–125. doi: <https://doi.org/10.1177/0020294019896000>
2. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., et al. Method for Determining the Optimal Operating Time before Replacement of High-Pressure Hoses of Hydraulic Drives of Transport and Technological Machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042065>
3. Rylyakin E.G., Semov I.N., Kukharev O.N. The Influence of the Oxidative Polymerization Processes on the Energy Consumption Due to Friction in the Resource Defining Hydraulic Couplings Hydraulic Drive Mate. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2019;49(1):1064–1069. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10\(1\)/%5B138%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2019_10(1)/%5B138%5D.pdf) (accessed 03.08.2022).
4. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., et al. Spectral Method for Monitoring the Technical Condition of Hydraulic Drives of Forest Harvester Machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042086>
5. Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., et al. Increasing the Level of Maintenance of Energy-Saturated Equipment. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(4):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-4-27-31>
6. Kostomakhin M.N., Kataev Yu.V., Petrishchev N.A., et al. System for Remote Monitoring of Tractors and Detection of Their Incorrect Operation. *Russian Engineering Research*. 2022;42(4):360–364. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X22040189>
7. Pavlov A.I., Tarbeev A.A., Egorov A.V., et al. New Method for Monitoring the Residual Life of High Pressure Hoses. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042082>
8. Shi L., Zhang W., Jiao H., et al. Numerical Simulation and Experimental Study on the Comparison of the Hydraulic Characteristics of an Axial-Flow Pump and a Full Tubular Pump. *Renewable Energy*. 2020;153:1455–1464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.082>

9. Pyanzov S.V., Senin P.V., Ionov P.A., et al. Developing the Test Bench Software for the Technical Inspection of Volumetric Hydraulic Drives. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):500–517. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.500-517>
10. Zhdanko D.A., Gerasimov V.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A. Development of Mobile Control Diagnostic Device. *Machinery Technical Service*. 2021;(1):34–44. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-1-34-44>
11. Battarra M., Mucchi E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gearpump Performance Prediction. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019;99:34–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102008>
12. Makarkin I.M., Dankov A.A., Ivleva I.B., et al. Modernization of the Bench KI-28097M-03 to Assess the Quality of Repair of Regulated Hydraulic Units. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivaniye i remont*. 2021;(9):36–41. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33920/sel-10-2109-05>
13. Pestryakov E.V., Sayapin A.S., Kostomakhin M.N., Petrishchev N. A. Analysis of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Neural Networks. In: Hu Z., Gavriushin S., Petoukhov S., He M. (eds). *Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics III. CSDEIS 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Vol. 121. Cham: Springer; 2022. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_9
14. Chumakov P.V., Martynov A.V., Kolomeychenko A.V., et al. Evaluation of Technical Condition of Round Gear Hydraulic Pumps of Tractor Mounted Hydraulic Systems. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):426–447. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.426-447>
15. Velichko S.A., Martynova E.G., Ivanov V.I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):448–463. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>
16. Kharlamov Yu.A., Zhiltsov A.P., Vishnevsky D.A., Bocharov A.V. Dimensional Analysis of Technological Processes for Reconditioning Machine Parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021;(5):37–47. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-5-37-47>
17. Polskiy Ye.A., Sorokin S.V. Improving the Reliability of Mechanical Engineering Products by Improving the Precision Analysis of Dimensional Chains. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;(6):38–48. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-6-38-48>
18. Frolov V.V. Design Calculation of Dimensional Chains on the Basis of Simulation Modeling. *Vestnik of Vitebsk State Technological University*. 2019;(2):76–88. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/2079-7958-2019-13709>
19. Khvashevskaya L.F., Zhuravlev D.A. Analysis of the Accuracy of Machine-Building Products for the Case of Parallel Connected Linear Dimensional Chains. *Systems. Methods. Technologies*. 2022;(1):48–56. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-48-56>
20. Beylin A.B., Tsarfin B.A. Research and Calculation of the Connected Dimensional Chains by the Example of Providing Indicators of Rotaryindexing Tables Accuracy. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2020;22(3):5–11. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-5-11>
21. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E. Design of High Precision Machining Part Processes in Free Abrasives. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022;247:157–167. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_17
22. Mitin E.V., Suldin S.P., Ovchinnikov A.Yu., et al. Determination of the Accuracy Parameters of Machining of a Part by the Graph Method Based on Dimensional Relations. *Vestnik mashinostroeniya*. 2022;(6):65–71. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-6-65-71>

Submitted 24.10.2022; approved after reviewing 21.11.2022; accepted for publication 28.11.2022

About the authors:

Pavel A. Ionov, 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), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, Researcher ID: S-7146-2018, resurs-ime@yandex.ru

Petr V. Senin, First Vice-Rector, 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, senin53@mail.ru

Sergey V. Pyanzov, Senior Lecturer 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: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, Researcher ID: B-1548-2019, serega.pyanzov@yandex.ru

Nikolay V. Rakov, 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: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, Researcher ID: ABF-2838-2020, nikolaymgu@yandex.ru

Alexander M. Zemskov, 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: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, Researcher ID: S-7748-2018, zam503@mail.ru

Contribution of the authors:

P. A. Ionov – forming the structure of the article, finalizing the initial text, conducting and describing experimental studies, drawing conclusions and conclusions.

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

S. V. Pyanzov – analyzing literature, preparing the text with subsequent revision, conducting and describing experimental studies, optimizing regression models, processing of the obtained results of the study.

N. V. Rakov – analyzing literature, calculating tolerances and limit variations in dimensions of critical parts connections.

A. M. Zemskov – conducting experimental studies.

All authors have read and approved the final manuscript.



Оценка эффективности почвообрабатывающего комбинированного культиватора

М. Н. Чаткин, С. Е. Федоров , А. А. Жалнин, М. В. Бычков
Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет (г. Саранск, Российская Федерация)

 seregafedorov1989@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время применение комбинированных машин и агрегатов позволяет значительно сократить время на обработку почвы и обеспечить требуемое качество. Совмещение операций в комбинированных машинах приводит к уменьшению влияния неблагоприятных погодных условий на технологические процессы. Использование данных машин позволяет лучше загрузить мощные трактора, особенно на участках с небольшой площадью, где работа с широкозахватными агрегатами затруднена. Совмещение технологических операций наиболее выгодно в интенсивном земледелии на полях без сорняков. Поэтому разработка технологий и средств механизации, позволяющих качественно и с наименьшими энергетическими и материальными затратами обеспечить подготовку почвы, является важной задачей. Цель исследования – оценить эффективность комбинированного культиватора для поверхностной обработки почвы и повысить качество его работы.

Материалы и методы. На основании многочисленных исследований и требований, предъявляемых к почвообрабатывающим машинам с упругими стойками, разработан комбинированный культиватор для поверхностной обработки почвы. Для оценки эффективности и изучения показателей работы культиватора был проведен многофакторный эксперимент первого порядка. За параметры оптимизации были приняты тяговое сопротивление секции культиватора и крошение почвы (размер фракций от 0 до 25 мм).

Результаты исследования. Применение экспериментального культиватора, по сравнению с серийными, позволяет снизить тяговое сопротивление на 10–15 %, а также повысить качество крошения почвы на 5–6 %.

Обсуждение и заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований доказана эффективность разработанного комбинированного культиватора. Использование данного культиватора приводит к снижению энергозатрат и улучшению качества обработки почвы.

Ключевые слова: обработка почвы, пружинная стойка, комбинированный культиватор, тяговое сопротивление, прикапывающий каток, эффективность, крошение почвы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка эффективности почвообрабатывающего комбинированного культиватора / М. Н. Чаткин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 539–551. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.539-551>



Evaluating the Operational Efficiency of a Combined Tillage Cultivator

M. N. Chatkin, S. Ye. Fedorov✉, A. A. Zhalnin, M. V. Bychkov
National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)

✉ seregafedorov1989@mail.ru

Abstract

Introduction. At present, the use of combined machines and aggregates makes it possible to significantly reduce the time for tillage, while ensuring the required quality. Combining operations in these machines also reduces the impact of adverse weather conditions on the performance of technological processes. The use of combined machines makes it possible to fully load large tractors, especially on the land plot of a small area, where working with wide web units is difficult. The combination of technological operations is most advantageous for intensive farming in fields free of weeds. Therefore, the development of technologies and means of mechanization, which allow preparing soil with high quality and the least energy and material costs, is an important task. The purpose of the study is to evaluate the efficiency of a combined cultivator for surface tillage and improve the quality of its work.

Materials and Methods. Based on numerous studies and requirements for tillage machines with elastic struts, a combined cultivator for surface tillage has been developed. To assess the efficiency and study the cultivator performance, a multifactorial experiment of the first order was conducted. Traction resistance of the cultivator section and soil crumbling (fraction size from 0 to 25 mm) were taken as optimization parameters.

Results. The use of an experimental cultivator, in comparison with serial ones, allows reducing the tractive resistance by 10–15%, and improving the quality of soil crumbling by 5–6%.

Discussion and Conclusion. The conducted experimental studies have proved the developed combined cultivator to be effective. The use of this cultivator leads to a reduction in energy consumption and improvement of the quality of tillage.

Keywords: tillage, spring rack, combined cultivator, traction resistance, rolling roller, effectiveness, soil crumbling

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

For citation: Chatkin M.N., Fedorov S.Ye., Zhalnin A.A., Bychkov M.V. Evaluating the Operational Efficiency of a Combined Tillage Cultivator. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):539–551. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.539-551>

Введение

В настоящее время при производстве сельскохозяйственной продукции на обработку почвы расходуется до 40 % энергии. Снижение расходов энергии возможно благодаря уменьшению количества обработок почвы и совершенствованию параметров рабочих органов. Однако при этом увеличиваются затраты на борьбу с сорной растительностью химическим способом. Упрощение конструкции рабочих

органов ведет к снижению тягового сопротивления агрегатов. Это влечет за собой ухудшение качества обработки почвы. С другой стороны, чтобы повысить качество обработки, необходимо дополнительно интенсифицировать воздействие на почву, что приведет к росту энергетических затрат [1–5].

При обработке почвы должны выполняться следующие условия: сохранение и улучшение физико-механических свойств почвы, уничтожение

сорной растительности, создание наиболее благоприятной среды для размножения и жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, прорастания семян, развития растений [6–8].

В современной земледелии одним из направлений снижения тягового сопротивления является совмещение технологических операций с учетом почвенно-климатических условий зоны применения и особенностей возделываемых сельскохозяйственных культур. Совмещение операций в комбинированных машинах и агрегатах позволяет снизить энерго- и материальные затраты, а также обеспечить влагосбережение [9; 10].

Для адаптации к различным условиям и состояниям обрабатываемого поля комбинированный культиватор необходимо оснастить такими рабочими органами и механизмами, которые обеспечат высокую эффективность выполнения всего комплекса взаимно дополняющих технологических операций. Поэтому исследования, направленные на разработку соответствующего почвообрабатывающего орудия, остаются актуальными и имеют большое значение для агропромышленного комплекса России.

Цель исследования – оценить эффективность комбинированного культиватора для поверхностной обработки почвы и повысить качество его работы.

Обзор литературы

Комбинированные культиваторы и агрегаты обычно выпускаются в полуприцепном исполнении и агрегируются с энергетическими средствами. Основными рабочими органами являются стрельчатые, долотообразные лапы и прикапывающие катки. Дополнительно на раме культиватора устанавливаются выравнивающие доски, обеспечивающие разбивку комков и выравнивание поверхности почвы, а также сферические диски. Лапы

устанавливаются на пружинных или жестких стойках [11].

В исследованиях установлено, что экономически выгодными являются почвообрабатывающие агрегаты с пружинными стойками. Широкое применение в конструкциях культиваторов и агрегатов нашли два типа пружинных стоек: S-образная и C-образная стойки. Данные стойки обладают лучшими энергетическими и агротехническими показателями, меньшим износом органов и возможностью работы на повышенных скоростях, что приводит к самоочистке от сорной растительности [12–14].

Основными недостатками пружинных стоек является то, что рабочие органы из-за неоднородности почвенного слоя в процессе работы отклоняются от первоначального положения. При увеличении угла наклона органа к горизонту возрастает тяговое сопротивление культиватора, бороздообразование, гребнистость и неустойчивость глубины обработки.

Для дробления глыб, уплотнения и выравнивания почвы, разрушения почвенной корки применяют катки. Поверхность рабочих органов катков разнообразна и предназначена для выполнения многообразных функций. На качество выполняемого технологического процесса влияет конструкция, геометрические размеры катков, кинематические и динамические параметры их работы, а также состояние обрабатываемого агрофона. Для эффективного крошения комков применяют прутковые катки. Продольно-прутковые катки сварной конструкции собраны в однорядную секцию и с помощью рычагов присоединяются к раме культиватора. Шарнирно-подпружиненное соединение катков с рамой агрегата обеспечивает копирование микрорельефа поля и предохраняет от поломок при встрече с препятствиями. Для обеспечения

качества выравнивания поверхности почвы применяют спиралевидную форму расположения прутков¹ [15–19].

Однако в современных конструкциях комбинированных культиваторов отсутствует автоматическое регулирование величины давления рабочих органов катков на почву в зависимости от ее состояния и физико-механических свойств.

Материалы и методы

Пружинную стойку с механической точки зрения можно представить в виде пружины двоякой кривизны, а с геометрической – как криволинейный стержень [20; 21].

Свободные изгибные колебания пружинной стойки можно описать следующим уравнением:

$$k \frac{d^4 u(x, t)}{dx^4} + h \frac{d^4 u(x, t)}{dt dx^4} + m \frac{d^2 u(x, t)}{dt^2} = 0, \quad (1)$$

где $u(x, t)$ – отклонение пружинной стойки от первоначального положения, м; k – жесткость стойки, Н/м; m – погонная масса стойки, кг/м; h – коэффициент, учитывающий внутреннее трение.

Для жесткого закрепления пружинной стойки к раме культиватора граничные условия имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u(0, t) = u(L, t) = 0 \\ \frac{du}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где L – длина пружинной стойки.

Жесткость стойки k и ее погонная масса m вычисляются по формулам (3) и (4).

Жесткость на изгиб пружинной стойки определяется по формуле:

$$k = \frac{2EJ \sin \beta_1}{2 + \mu \cos^2 \beta_1 + \frac{\mu \cos^2 \beta_1}{4\pi i_1} \sin 4\pi i_1}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости, Па; $J = \frac{bh}{12}(h^2 + b^2)$ – осевой момент инерции стойки, м⁴; β_1 – угол наклона, град; i_1 – число витков, шт; μ – коэффициент Пуассона.

$$m = \frac{\pi \cdot S_{\text{сеч}} \cdot D \cdot i_1 \cdot \gamma}{L \cdot \cos \beta_1 \cdot g}, \quad (4)$$

где D – диаметр пружины, м; $S_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения, м²; γ – удельный вес материала (плотность сложения), н/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Вышеперечисленные параметры рыхлительного рабочего органа обеспечивают устойчивость хода по глубине, интенсивность колебательного процесса и вероятность его выглубления с учетом почвенных условий.

Максимальная плотность почвы при уплотнении ее прутком катка достигается при его заглублении на глубину, равную радиусу прутка. При дальнейшем его заглублении происходит увеличение глубины распространения уплотнения [22–25].

Для определения расстояния между центрами прутков катка l рассмотрим случай, когда в почву внедряется только один пруток и глубина его погружения равна его радиусу r .

Из данных рисунка 1 расстояние между центрами прутков определяется по выражению [16]:

$$l^2 = 2R^2 - 2R^2 \cos 2\alpha, \quad (5)$$

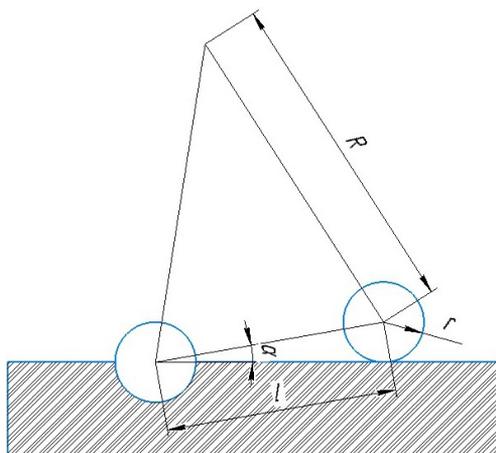
где R – радиус катка, м; α – угол заглубления прутка катка; град.

Зная, что $\cos 2\alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha$, после преобразования уравнения (5) получим:

$$l = \sqrt{2r \cdot R}. \quad (6)$$

где r – радиус прутка, м.

¹ Проектирование катковых приставок для пахотных агрегатов. Рекомендации / И. С. Крук [и др.]. Минск. : БГАТУ, 2017. 104 с.



Р и с. 1. Схема к определению расстояния между центрами прутков

F i g. 1. Diagram for determining the distance between the centers of the bars

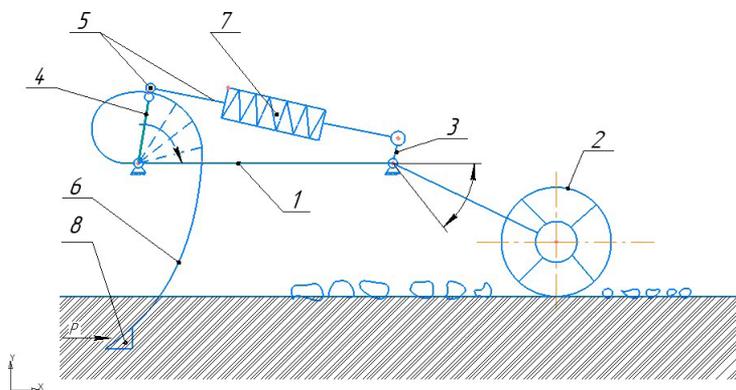
С агротехнической точки зрения автоматические изменения жесткости стойки и силы давления катка на почву позволяют повысить качество обработки почвы, уменьшить потери почвенной влаги, а также снизить затраты энергии при обработке почвы тяжелого механического состава. При прохождении агрегата по уплотненному участку

увеличиваются давление катка на почву и жесткость стойки, и наоборот, при прохождении агрегата по рыхлому участку давление катка на почву и жесткость уменьшаются. Это приводит к повышению качества обработки почвы [26–31].

На основании этого предложена и разработана конструкция комбинированного культиватора (рис. 2).

В конструкцию комбинированного культиватора введен механизм регулирования 5 глубины хода рабочих органов 8, закрепленных на пружинных стойках 6. Механизм регулирования 5 шарнирно закреплен с одной стороны к раме 1 культиватора через рычаг 3, а с другой – к регулятору жесткости 4.

В процессе работы, в зависимости от силы P , которая действует на рабочие органы 8 и определяется физико-механическими свойствами почвы на конкретном участке поля, стойка 6 деформируется. Сигнал от деформируемой стойки поступает на следящее звено, которое, в зависимости от величины сигнала, изменяет положение механизма регулирования 5, увеличивая или снижая жесткость стойки 6.



Р и с. 2. Комбинированный культиватор: 1 – рама; 2 – почвообрабатывающий каток; 3 – рычаг; 4 – регулятор жесткости; 5 – механизм регулирования; 6 – пружинная стойка; 7 – пружина; 8 – рабочий орган

F i g. 2. Combined cultivator: 1 – frame; 2 – tillage roller; 3 – lever; 4 – stiffness regulator; 5 – control mechanism; 6 – spring rack; 7 – spring; 8 – working organ

Одновременно при изменении положения регулятора 4 меняется воздействие на пружину 7, а от рычага 3 соответствующее усилие передается на подвеску катка.

Пружина 7 в механизме выступает как упругий элемент, основным рабочим свойством которого является способность существенно деформироваться под нагрузкой. Как правило, эта деформация упругая, и после снятия нагрузки элемент восстанавливает свои размеры.

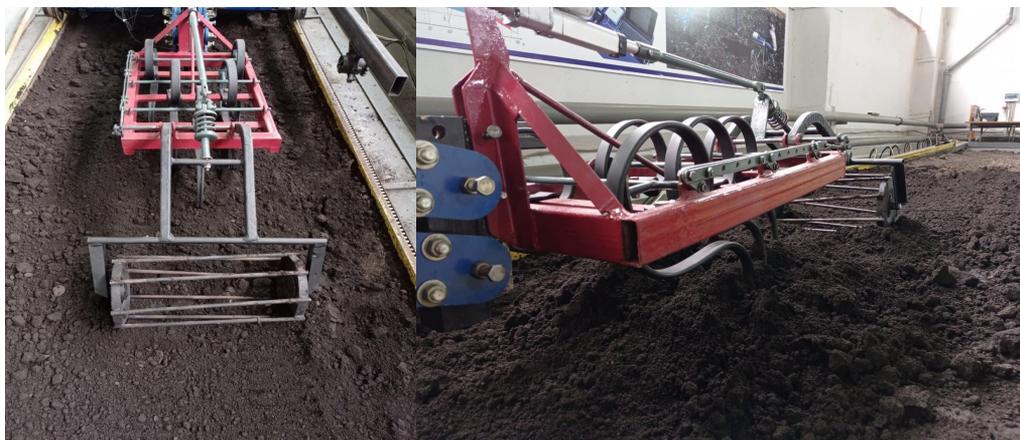
При перемещении агрегата по полю с изменением (ростом) плотности участка почвы регулятор жесткости 4 поворачивается по часовой стрелке, увеличивая жесткость стойки 6, преодолевает сопротивление пружины 7 (сжимает ее) и воздействует на рычаг 3, который перемещается вниз, усиливая давление на каток. Происходит стабилизация глубины хода рабочих органов 8 на пружинных стойках 6, и усиливается давление катка 2. Пройдя уплотненный участок поля, жесткость стойки 6 автоматически понижается, механизм разжимает пружину, происходит снижение давления катка 2, а стойка 6 с рабочим органом 8 при уменьшении жесткости увеличивает амплитуду колебаний. Этим обеспечивается повышение качества

обработки в зависимости от плотности почвы.

С целью дальнейшего исследования взаимодействия рыхлящих, дробящих и прикатывающих рабочих органов на почву на базе Института механики и энергетики МГУ им. Н. П. Огарёва была разработана экспериментальная модель комбинированного культиватора (секция культиватора). Данную модель культиватора испытывали на почвенном канале кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина (рис. 3).

Почвенный канал заполнен легкосуглинистой почвой влажность 17–21 %, твердость поддерживали постоянной на различной глубине обработки. На глубине 4 см твердость была 1,15 МПа, 8 см – 1,2 МПа, 12 см – 1,25 МПа.

В качестве критерия оптимизации рассматривали тяговое сопротивление секции культиватора и крошение почвы (размер фракций от 0 до 25 мм). С использованием методики априорного ранжирования были определены следующие факторы, оказывающие наибольшее влияние на критерии оптимизации: скорость культиватора, глубина обработки и давление катка на почву.



Р и с. 3. Лабораторная установка по испытанию культиватора

F i g. 3. Laboratory installation for testing the cultivator

Тяговое усилие на перемещение секции культиватора замеряли с помощью тягового звена, подключенного к компьютеру через комплекс ZETlab.

Результаты исследования

Для оценки эффективности и изучения показателей работы культиватора был проведен многофакторный эксперимент первого порядка. Экспериментальные исследования секции культиватора проводили с внедрением в ее конструкцию механизма регулирования 5 (рис. 2) жесткости стойки и давления катка на почву и без него (серийная секция культиватора). Результаты экспериментальных исследований секции культиватора представлены на рисунках 4 и 5.

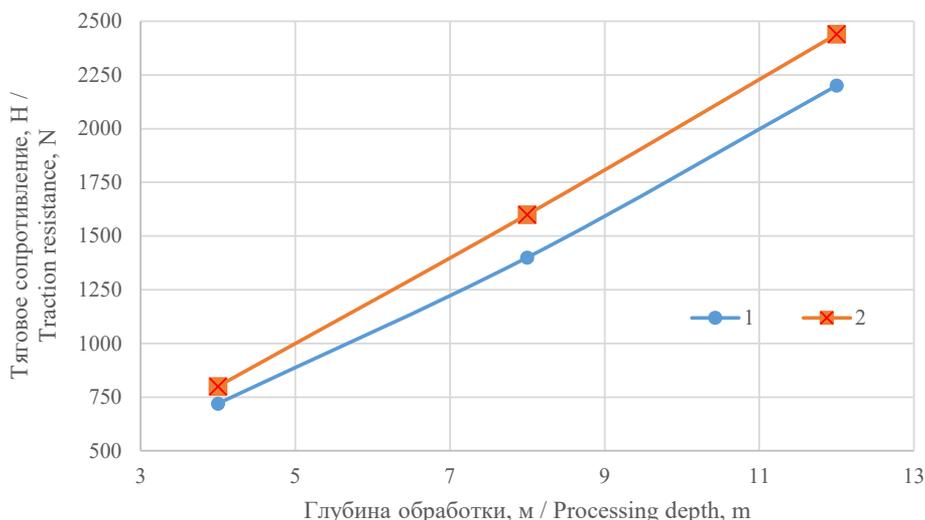
Из полученной зависимости следует, что при увеличении глубины обработки тяговое сопротивление возрастает. Однако применение в конструкции модели культиватора механизма регулирования приводит к снижению его тягового сопротивления по сравнению с серийным. Это связано с уменьшением рабочей длины упругой стойки.

В связи с этим увеличивается ее жесткость, а угол наклона рабочего органа (стрельчатой лапы, закрепленной на стойке) к горизонту уменьшается.

Как видно на рисунке 5, крошение почвы при ее обработке экспериментальным культиватором выше по сравнению с серийным. Это достигается благодаря увеличению давления прикатывающего катка на почву. Однако с увеличением глубины обработки крошение почвы понижается.

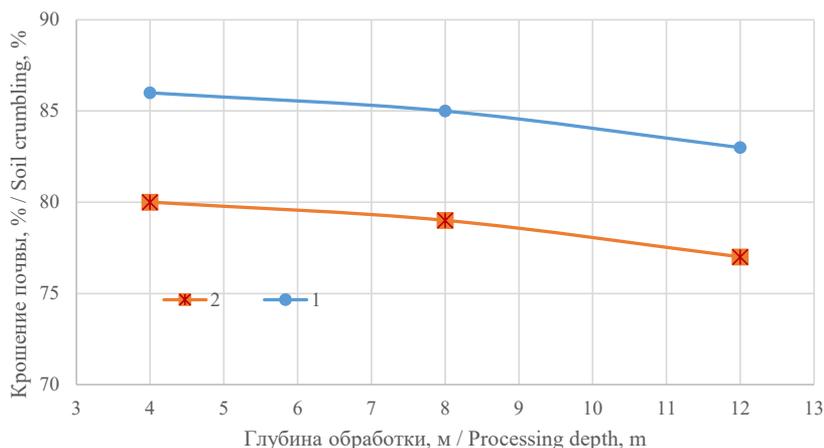
Обсуждение и заключение

Использование разработанной модели культиватора (секции культиватора) приводит к снижению тягового сопротивления на 10–15 % и к улучшению крошения почвы. Это возможно благодаря внедрению в конструкцию культиватора механизма регулирования. В процессе работы на твердых участках поля угол наклона рабочих органов (стрельчатых лап) к горизонту не увеличивается, а дополнительное приложенное усилие к катку способствует разрушению образовавшихся больших комков почвы.



Р и с. 4. Изменение тягового сопротивления от глубины обработки (скорость 12 км/ч):
1 – экспериментальный культиватор; 2 – серийный культиватор

F i g. 4. Change in tractive resistance caused by the tillage depth (speed 12 km/h):
1 – experimental cultivator; 2 – serial cultivator



Р и с. 5. Зависимость крошения почвы от глубины обработки (скорость 12 км/ч):
1 – экспериментальный культиватор; 2 – серийный культиватор

F i g. 5. Dependence of soil crumbling on the tillage depth (speed 12 km/h):
1 – experimental cultivator; 2 – serial cultivator

Полученные положительные результаты при лабораторных испытаниях являются предпосылкой для дальнейшей работы по обоснованию конструктивно-технологических па-

раметров и режимов работы комбинированного культиватора для поверхностной обработки с последующими испытаниями в полевых условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абдурахмонов У. Н. Орудия для поверхностной обработки почвы // Наука, техника и образование. 2021. № 7. С. 15–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47396150> (дата обращения: 01.09.2022).
2. Мартынов И. С., Шапров М. Н. Рабочий орган для поверхностной обработки почвы // Сельский механизатор. 2021. № 6. С. 40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46454592> (дата обращения: 01.09.2022).
3. Нишинов Б. М. Теоретическое обоснования ротационного рыхлителя для поверхностной обработки почвы // Точная наука. 2021. № 114. С. 8–14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47152008> (дата обращения: 01.09.2022).
4. Повышение качества поверхностной обработки почвы / С. Е. Федоров [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2020. № 4. С. 121–127. doi: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.48.4.017>
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: 01.09.2022).
6. Кокошин С. Н., Черенцов Д. А., Ташланов В. И. Применение регулятора жесткости в конструкциях культиваторов // Вестник АПК Ставрополя. 2020. № 2–3. С. 4–9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44175815> (дата обращения: 01.09.2022).
7. Федоров С. Е., Жалнин А. А. Способы изменения жесткости упругих S-образных стоек культиваторов [Электронный ресурс] // Научное обозрение. Международный

- научно-практический журнал. 2020. № 2. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42955151> (дата обращения: 01.09.2022).
8. Evaluation of the Stress State of a Cultivator Blade in Production and Operation / T. Skoblo [et al.] // Research in Agricultural Engineering. 2020. Vol. 66, Issue 2. P. 60–65. doi: <https://doi.org/10.17221/8/2020-RAE>
 9. Khudoyberdiev T. S., Kholdarov M. Sh. Sectional Cultivator for Processing between Rows-to Develop a Design of a Deep Softener // Theoretical & Applied Science. 2022. Issue 3. P. 301–305. doi: <https://doi.org/10.15863/TAS.2022.03.107.16>
 10. Efremova V. N. Features of Soil Treatment by a Multi-Legal Plug // Colloquium-Journal. 2019. Issue 2–2. P. 38–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36850831> (дата обращения: 01.09.2022).
 11. The Trend of Tillage Equipment Development / S. I. Starovoytov [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 3. P. 77–81. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45032510> (дата обращения: 01.09.2022).
 12. Combined Technology of Basic Tillage for Dry Farming Zone Conditions / S. Startsev [et al.] // Journal of Agriculture and Environment. 2019. Issue 4. P. 10–14. doi: <https://doi.org/10.23649/jae.2019.4.12.3>
 13. Pelech L. Formation of Productivity of Winter Wheat Crops Depending on Agrotechnical Methods of Tillage // The Scientific Heritage. 2021. Issue 62. P. 5–8. doi: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-62-1-5-8>
 14. Aliyev I. H., Aliyev Z. H. On Evaluating the Effect of Soil Treatment and Fertilizer on the Cultivation of Grain Crops // Natural Resources of the Earth and Environmental Protection. 2020. Vol. 1, Issue 3. P. 4–8. doi: <https://doi.org/10.26787/nydha-2713-203X-2020-1-3-4-8>
 15. Seitkaziev A. S., Salybaev S. Zh., Elemesov Zh. Methods for Improving Soil Treatment on Degraded Lands // Theoretical & Applied Science. 2020. Issue 6. P. 257–260. doi: <https://doi.org/10.15863/TAS.2020.06.86.51>
 16. Добринов А. В., Джабборов Н. И., Чугунов С. В. Сравнительная оценка эффективности рабочих органов для обработки почвы и уничтожения сорных растений // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 2. С. 465–480. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49222449> (дата обращения: 01.09.2022).
 17. Маматожиёв Ш. И., Мирзаева М. А., Шокирова Г. Н. Влияние технологии допосевной обработки на содержание влаги в почве // Universum: технические науки. 2021. № 6–3. С. 46–49. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46311803> (дата обращения: 01.09.2022).
 18. Камбулов С. И., Божко И. В. Агрегат для комбинированной обработки почвы АПК-4 // Аграрный научный журнал. 2020. № 9. С. 78–82. doi: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i9pp78-82>
 19. Савельев Ю. А., Добрынин Ю. М. Исследование процесса работы комбинированного почвообрабатывающего орудия // Научная мысль. 2018. № 5. С. 40–47. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39841923> (дата обращения: 01.09.2022).
 20. Improving Long-Term Crop Productivity and Soil Quality through Integrated Straw-Return and Tillage Strategies / S. Li [et al.] // Agronomy Journal. 2022. Vol. 114, Issue 2. P. 1500–1511. doi: <https://doi.org/10.1002/agj2.20831>
 21. Пархоменко Г. Г. Реализация природоподобных технологий при разработке новых рабочих органов для обработки почвы в засушливых условиях // Тракторы и сельхозмашины. 2019. Т. 86, № 6. С. 65–73. doi: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-6-65-73>
 22. Abdusalam T., Gafurovich A. K., Nakibbekovich B. S. Determining the Appropriate Values of Compactor Parameters of the Enhanced Harrow Leveler // Civil Engineering and Architecture. 2020. Vol. 8, Issue 3. P. 218–223. doi: <https://doi.org/10.13189/cea.2020.080304>
 23. Семенова Г. А., Джабборов Н. И. Обоснование конструктивных параметров динамичных почвообрабатывающих рабочих органов // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3. С. 501–507. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36314221> (дата обращения: 01.09.2022).

24. Physicochemical and Biological Indicators of Soils in an Organic Farming System [Электронный ресурс] / В. Nasiyev [et al.] // The Scientific World Journal. 2021. Vol. 2021. doi: <https://doi.org/10.1155/2021/9970957>

25. Technologies to Deliver Food and Climate Security through Agriculture / P. Horton [et al.] // Nature Plants. 2021. Vol. 7, Issue 3. P. 250–255. doi: <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00877-2>

26. Принципы ресурсосберегающих технологий возделывания зерновых культур в условиях юго-запада центрального региона России / О. В. Мельников [и др.] // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2. С. 3–8. doi: <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2022-90-2-3-8>

27. Shkarubo S. N. Growing Grain Crops in Russia: Historical Context // Agrarian History. 2022. Issue 10. P. 20–26. doi: https://doi.org/10.52270/27132447_2022_10_20

28. Study of the Process of Movement Stability of Mounted Cultivator Working Bodies on Combined Inter-Tillage of Vegetable Crops / В. Y. Kalimbetov [et al.] // Eurasian Journal of BioSciences. 2020. Vol. 14, Issue 1. P. 1281–1286. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45346790> (дата обращения: 01.09.2022).

29. Конкурентоспособная модель комбинированного почвообрабатывающего агрегата / Н. М. Ожегов [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. 2018. № 1. С. 18–22. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34900734> (дата обращения: 01.09.2022).

30. Федоров С. Е. Применение дифференцированной обработки почвы // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 78–82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32877782> (дата обращения: 01.09.2022).

31. Belov M. I. Evaluation of Energy Requirement of Tillage with a Rotary Tiller // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022. Issue 28. P. 87–93. doi: <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-28-87-93>

Поступила 26.09.2022; одобрена после рецензирования 22.10.2022; принята к публикации 05.11.2022

Об авторах:

Чаткин Михаил Николаевич, профессор 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), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, Researcher ID: [O-7004-2018](https://orcid.org/0000-0002-3758-7066), chatkinm@yandex.ru

Федоров Сергей Евгеньевич, 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/0000-0002-7784-1946>, Researcher ID: [GSD-7587-2022](https://orcid.org/0000-0002-7784-1946), seregafedorov1989@mail.ru

Жалнин Алексей Александрович, преподаватель 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/0000-0002-0719-9492>, Researcher ID: [GSE-3853-2022](https://orcid.org/0000-0002-0719-9492), alekseism@yandex.ru

Бычков Максим Владимирович, 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/0000-0003-0521-3294>, Researcher ID: [GSI-5982-2022](https://orcid.org/0000-0003-0521-3294), maxim95a@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

М. Н. Чаткин – научное руководство, анализ и доработка текста.

С. Е. Федоров – подготовка текста с последующей доработкой, анализ литературных данных.

A. A. Жалнин – литературный и патентный анализ.
M. В. Бычков – проведение лабораторных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Abdurakhmonov U.N. Tools For Surface Tillage. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*. 2021;(7):15–19. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47396150> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Martynov I.S., Shaprov M.N. Working Body for Surface Tillage. *Selskiy mekhanizator*. 2021;(6):40. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46454592> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Nishonov B.M. Theoretical Basis of Rotary Cutter for Surface Treatment. *Tochnaya nauka*. 2021;(114):8–14. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47152008> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Fedorov S.E., Zhalnin A.A., Zhalnin N.A., Polunkin A.A. Improving the Quality of Surface Tillage. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2020;(4):121–127. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2020.48.4.017>
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 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kokoshin S.N., Cherentsov D.A., Tashlanov V.I. Application of Rigidity Regulator in Structures of Cultivators. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2020;(2–3):4–9. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44175815> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Fedorov S.Ye., Zhalnin A.A. Ways to Change the Stiffness of Elastic S-Shaped Stands in Cultivators. *Nauchnoe obozrenie. Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal*. 2020;(2). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42955151> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Skoblo T., Rybalko I., Tihonov A., Maltsev T. Evaluation of the Stress State of a Cultivator Blade in Production and Operation. *Research in Agricultural Engineering*. 2020;66(2):60–65. doi: <https://doi.org/10.17221/8/2020-RAE>
9. Khudoyberdiev T.S., Kholdarov M.Sh. Sectional Cultivator for Processing between Rows-to Develop a Design of a Deep Softener. *Theoretical & Applied Science*. 2022;(3):301–305. doi: <https://doi.org/10.15863/TAS.2022.03.107.16>
10. Efremova V.N. Features of Soil Treatment by a Multi-Legal Plug. *Colloquium-Journal*. 2019;(2–2):38–39. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36850831> (accessed 01.09.2022).
11. Starovoytov S.I., Akhalaya B.H., Sidorov S.A., Mironova A.V. The Trend of Tillage Equipment Development. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):77–81. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45032510> (accessed 01.09.2022).
12. Startsev S., Boykov V., Pavlov A., Bashmakov I. Combined Technology of Basic Tillage for Dry Farming Zone Conditions. *Journal of Agriculture and Environment*. 2019;(4):10–14. doi: <https://doi.org/10.23649/jae.2019.4.12.3>
13. Pelech L. Formation of Productivity of Winter Wheat Crops Depending on Agrotechnical Methods of Tillage. *The Scientific Heritage*. 2021;(62):5–8. doi: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-62-1-5-8>
14. Aliyev I.H., Aliyev Z.H. On Evaluating the Effect of Soil Treatment and Fertilizer on the Cultivation of Grain Crops. *Natural Resources of the Earth and Environmental Protection*. 2020;1(3):4–8. doi: <https://doi.org/10.26787/nydha-2713-203X-2020-1-3-4-8>

15. Seitkaziev A.S., Salybaev S.Zh., Elemesov Zh. Methods for Improving Soil Treatment on Degraded Lands. *Theoretical & Applied Science*. 2020;(6):257–260. doi: <https://doi.org/10.15863/TAS.2020.06.86.51>
16. Dobrinov A.V., Dzhabborov N.I., Chugunov S.V. Comparative Assessment of the Efficiency of Working Parts for Soil Treatment and Destruction of Weeds. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science And Higher Education*. 2022;(2):465–480. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49222449> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Mamatozhiev Sh.I., Mirzaeva M.A., Shokirova G.N. Influence of Seeding Treatment Technology on Moisture Content in Soil. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021;(6–3):46–49. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46311803> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Kambulov S.I., Bozhko I.V. Aggregate for Combined Treatment of Soil APK-4. *Agrarian Scientific Journal*. 2020;(9):78–82. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i9pp78-82>
19. Savel'jev Y.A., Dobrynin Y.M. Study of the Process of Combined Tillage Tools. *Nauchnaya mysl*. 2018;(5):40–47. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39841923> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Li S., Hu M., Shi J., Tian X. Improving Long-Term Crop Productivity and Soil Quality through Integrated Straw-Return and Tillage Strategies. *Agronomy Journal*. 2022;114(2):1500–1511. doi: <https://doi.org/10.1002/agj.2.20831>
21. Parhomenko G.G. Implementation of Nature-Like Technologies in the Development of New Working Bodies for Tillage in Arid Conditions. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2019;86(6):65–73. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-6-65-73>
22. Abdusalim T., Gafurovich A.K., Nakibbekovich B.S. Determining the Appropriate Values of Compactor Parameters of the Enhanced Harrow Leveler. *Civil Engineering and Architecture*. 2020; 8(3):218–223. doi: <https://doi.org/10.13189/cea.2020.080304>
23. Semenova G.A., Dzhabborov N.I. Justification of Design Parameters of Dynamic Soil-Cultivating Working Bodies. *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2018;(3):501–507. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36314221> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Nasiyev B., Vassilina T., Zhylykybay A., et al. Physicochemical and Biological Indicators of Soils in an Organic Farming System. *The Scientific World Journal*. 2021;2021. doi: <https://doi.org/10.1155/2021/9970957>
25. Horton P., Long S.P., Smith P., et al. Technologies to Deliver Food and Climate Security through Agriculture. *Nature Plants*. 2021;7(3):250–255. doi: <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00877-2>
26. Melnikova O.V., Torikov V.E., Repnikova V.I., Melnikov D.M. Principles of Resource-Saving Technologies of Grain Crops Cultivation in the Conditions of the South-West of the Central Region of Russia. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2022;(2):3–8. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2022-90-2-3-8>
27. Shkarubo S.N. Growing Grain Crops in Russia: Historical Context. *Agrarian History*. 2022; (10):20–26. doi: https://doi.org/10.52270/27132447_2022_10_20
28. Kalimbetov B.Y., Orymbetova G.E., Tukhtakuziyev A., et al. Study of the Process of Movement Stability of Mounted Cultivator Working Bodies on Combined Inter-Tillage of Vegetable Crops. *Eurasian Journal of BioSciences*. 2020;14(1):1281–1286. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45346790> (accessed 01.09.2022).
29. Ozhegov N.M., Ruzhyev V.A., Krishtanov E.A., Dzibuk I.S. Competitive Model of Combined Tillage Unit. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2018;(1):18–22. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34900734> (accessed 01.09.2022).
30. Fedorov S.E. Application of Differentiated Tillage. *Traktory i selkhoz mashiny*. 2018;(2):78–82. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32877782> (accessed 01.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

31. Belov M.I. Evaluation of Energy Requirement of Tillage with a Rotary Tiller. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2022;(28):87–93. doi: <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-28-87-93>

Submitted 26.09.2022; approved after reviewing 22.10.2022; accepted for publication 05.11.2022

About the authors:

Mikhail N. Chatkin, Professor of the Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, Researcher ID: O-7004-2018, chatkinm@yandex.ru

Sergey Ye. Fedorov, Associate Professor of the 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/0000-0002-7784-1946>, Researcher ID: GSD-7587-2022, seregafedorov1989@mail.ru

Aleksey A. Zhalnin, Lecturer of the Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0719-9492>, Researcher ID: GSE-3853-2022, alekseisxm@yandex.ru

Maksim V. Bychkov, Postgraduate Student of the Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-3294>, Researcher ID: GSI-5982-2022, maxim95a@rambler.ru

Contribution of the authors:

M. N. Chatkin – scientific guidance, analysis and revision of the text.

S. Ye. Fedorov – preparing the text with subsequent revision, analyzing literature.

A. A. Zhalnin – analyzing literature and patents.

M. V. Bychkov – conducting laboratory tests.

All authors have read and approved the final manuscript.



Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна

В. П. Димитров , Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова

Донской государственный технический университет

(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

 kaf-qm@donstu.ru

Аннотация

Введение. Представлено решение задачи идентификации предметной области «предварительная настройка рабочих органов жатвенной части комбайна». Правильный выбор значений параметров жатвенной части как важнейшего элемента комбайна – одно из главных условий обеспечения высокого качества уборки, что и определило объект настоящего исследования. Цель исследования – разработка метода выбора значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна, соответствующих убираемой культуре и условиям уборки.

Материалы и методы. Решения о значениях технологических параметров комбайна, являющегося сложной иерархической системой, принимаются на основе информации о внешней среде и техническом состоянии машины. Поступающие данные имеют количественный, качественный и оценочный характер. Учитывая разнородность и нечеткость информации, для принятия решения применяются интеллектуальные информационные системы, основанные на математическом аппарате нечеткой логики и использующие лингвистический подход для описания предметной области. Данный подход применяется из-за сложности и неоднозначности взаимосвязей между регулируемыми параметрами и внешними факторами.

Результаты исследования. Исследована предметная область «предварительная настройка параметров жатвенной части комбайна». Подробно описана формально-логическая схема выбора значений регулируемых параметров жатвенной части. Установлены основные факторы, влияющие на значения регулируемых параметров жатвенной части, дано их лингвистическое описание, введены соответствующие входные и выходные лингвистические переменные, на основе экспертной информации построены функции принадлежности. Проведен анализ согласованности представленной информации и выбраны оптимальные модели. Создана база нечетких знаний, на которой основан дедуктивный вывод решений.

Обсуждение и заключение. Предложенный подход и созданная база нечетких знаний могут быть положены в основу интеллектуальной системы принятия решений по настройке регулируемых параметров комбайна. Применение такой системы в полевых условиях вместе с датчиками непрерывного мониторинга условий уборки урожая и автоматизированной системой анализа изображений позволит оперативно реагировать на изменение условий, существенно повысит результативность работы и сократит время принятия решений.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, технологическая регулировка, принятие решений, лингвистическая переменная, функция принадлежности, нечеткий логический вывод

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Димитров В. П., Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н., 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: Димитров В. П., Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н. Метод определения начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 552–566. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>

Original article

Method for Determining the Initial Values of the Adjustable Parameters of the Combine Harvester Cutting Unit

V. P. Dimitrov , L. V. Borisova, I. N. Nurutdinova

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

 kaf-qm@donstu.ru

Abstract

Introduction. The article presents the solution of the problem of identifying the subject area “Preliminary adjustment of the working elements of the combine harvester cutting unit”. The correct choice of parameter values of the cutting unit as the most important element of a combine harvester is one of the main conditions for providing high quality harvesting. It is the fact that defined the object of the present study. The aim of the study is to develop a method for adjusting the values of parameters of a combine harvester cutting unit for the harvested crop and harvesting conditions.

Materials and Methods. Decisions on the values of technological parameters of the harvester, which is a complex hierarchical system, are made on the basis of information about the external environment and the machine technical state. The incoming data are quantitative, qualitative and evaluative in nature. Taking into account the heterogeneity and vagueness of the information, the decisions are made through using intelligent information systems, which are based on the fuzzy logic programming and use a linguistic approach to describe the subject area. This approach is used because of the complexity and ambiguity of the relationships between regulated parameters and external factors.

Results. The subject area “Preliminary adjustment of the combine harvester cutting unit parameters” has been investigated. The formal-logical scheme for selecting the values of adjustable parameters of the combine harvester cutting unit is described in detail. The main factors influencing the values of the combine harvester cutting unit adjustable parameters are defined, their linguistic description is given, the corresponding input and output linguistic variables are introduced, and the membership functions are built on the basis of expert information. The agreement analysis of the presented information has been carried out and optimal models have been selected. A fuzzy knowledge base is created, on which the deductive inference of decisions is based.

Discussion and Conclusion. The proposed approach and created fuzzy knowledge base can be used as the basis for an intelligent decision-making system for adjusting combine parameters. Using this system in the field in combination with sensors for continuous monitoring of harvesting conditions and an automated image analysis system will allow responding quickly to changing conditions, will significantly improve operational efficiency and reduce decision-making time.

Keywords: grain harvester, technological adjustment, decision-making, linguistic variable, membership function, fuzzy inference

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

For citation: Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. Method for Determining the Initial Values of the Adjustable Parameters of the Combine Harvester Cutting Unit. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):552–566. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.552-566>

Введение

Качество процесса уборки зерновых и других сельскохозяйственных культур в значительной мере определяется тем, насколько установленные регулируемые параметры комбайна соответствуют условиям уборки. Зерноуборочный комбайн – одна из самых сложных сельскохозяйственных машин, обеспечивающих механизацию уборочных работ в растениеводстве. Задача технологической регулировки машины далеко не простая, так как отношения между внешними факторами, регулируемыми параметрами и характеристиками качества уборки характеризуются многосвязностью, неоднозначностью, исходная информация носит нечеткий характер и не определена система предпочтений лица, принимающего решения. В результате этого на практике зачастую наблюдаются потери зерна, засорение и дробление, что обусловлено неадекватностью технологической настройки конкретным условиям [1].

Поскольку внешние условия, в которых работает комбайн, существенно влияют на установочные параметры, то к информации о внешних факторах предъявляются высокие требования в части достоверности и адекватности. Информация поступает в виде оценок экспертов, а также в результате обработки данных датчиков и анализа изображений, что говорит о ее нечетком характере. Взаимосвязи регулируемых параметров комбайна с внешними условиями еще более очевидно можно отнести к нечетким в силу неконкретного описания внешних условий, а также неоднозначности и наличия сложных корреляционных зависимостей. Для описания функционирования подобных систем традиционные методы математического моделирования, такие

как построение регрессионных моделей и другие статистические методы, опирающиеся на экспериментальные данные и цифровую обработку [2–6], практически непригодны, поскольку применимы только в рассматриваемом диапазоне величин, а оперативное переключение модели, необходимое в полевых условиях, невозможно без анализа новых экспериментальных данных. Помимо этого, наличие множества неоднозначных связей между внешними условиями, регулируемыми параметрами и показателями качества уборки приводит к трудно оптимизируемым, громоздким математическим конструкциям в рамках множественного регрессионного анализа и делает само применение этого подхода неэффективным.

Перспективным направлением решения данной задачи является проектирование интеллектуальных систем, использующих экспертные знания и обеспечивающих эффективность управления различными техническими системами¹. Создание интеллектуальной системы для технологической регулировки предполагает идентификацию предметной области, логико-лингвистическое описание и привлечение математического аппарата нечеткой логики.

Целью настоящей работы является разработка метода выбора начальных значений регулируемых параметров жатвенной части зерноуборочного комбайна.

Обзор литературы

Для описания процессов принятия решений по управлению технологическими процессами в сложных системах используется математический аппарат нечеткой логики. В последние годы он достаточно широко применяется для решения задач агропромышленного комплекса, среди которых идентификация сорняков, оценка урожайности,

¹ Аверкин А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М. : Книга по требованию, 2021. 312 с.

оценка качества почвы, повышение продуктивности культур и эффективности использования удобрений и др. [7–10]. Обосновано применение данного подхода к оценке значений регулируемых параметров комбайна [11–13] и к проблеме оперативной корректировки технологических настроек в случае обнаружения нарушений качества уборки [14].

Задача предварительной настройки относится к классу задач принятия решений в нечетких условиях, поскольку характеристики внешних факторов имеют нечеткие размытые границы, неоднозначно влияние различных комбинаций параметров настройки на показатели качества уборки, а устанавливаемые априорно взаимосвязи могут оказаться неадекватными для реальной ситуации. Все эти факты послужили основанием для выбора способа решения данной задачи – создания интеллектуальной системы, использующей для получения решения нечеткий логический вывод, основанный на информации экспертного, оценочного и эвристического характера [11]. Источниками такой информации являются квалифицированные специалисты в данной области, накопленные знания о взаимосвязях показателей качества уборки, внешние условия и параметры настройки комбайна. Такой подход был использован для вывода важнейших регулируемых параметров комбайна: скорости движения, частоты вращения молотильного барабана, частоты вращения вентилятора очистки [11; 15].

Наряду с перечисленными параметрами для качественной уборки урожая существенное значение имеет правильный выбор параметров жатвенной части комбайна, таких как вынос мотовила по вертикали и горизонтали и другие. Предварительная настройка регулируемых параметров комбайна, соответствующих условиям уборки, охватывает весь комплекс параметров,

и настоящее исследование посвящено разработке метода выбора оптимальных значений параметров жатвенной части. В проведенных ранее исследованиях представлено лингвистическое описание внешних факторов, рассмотрены урожайность, влажность, засоренность и соломистость зерна [11; 14; 15]. На основе алгоритма были установлены оптимальные модели лингвистических переменных, соответствующих перечисленным факторам [16]. Для настройки параметров жатвенной части являются актуальными и другие параметры, такие как высота, полеглость хлебостоя и другие. Их лингвистическое описание представлено в другой работе [17].

В данном исследовании в рамках разработанного метода выбора параметров жатвенной части описано систематизированное формально-логическое построение условий задачи, включающее лингвистическое описание внешних факторов и регулируемых параметров жатвенной части и создана система правил нечетких продукций для вывода решения.

Материалы и методы

Предлагаемый подход к формированию метода предварительной настройки регулируемых параметров жатвенной части базируется на математическом аппарате нечеткой логики и в общем виде состоит из этапов фаззификации, композиции и дефаззификации [11; 15]. Далее остановимся подробно на каждом из них.

На этапе фаззификации формулируется лингвистическое описание условий задачи [18], определяется множество $\{X\}$ входных переменных задачи в виде совокупности значений факторов внешней среды, существенно влияющих на величину выходной переменной Y – регулируемого параметра машины. В нашем случае при наличии нескольких регулируемых параметров выводы их значений рассматриваются как параллельные процессы.

Модели входных и выходных признаков X, Y представляются в виде семантических пространств и соответствующих им функций принадлежности (ФП) [18].

Следующие этапы решения включают квалиметрическую оценку шкал носителя, выбор базовых и расширенных терм-множеств лингвистической переменной (ЛП), построение ФП одним из методов, проверку выполнения требований к ФП, оценку степени согласованности нечетких экспертных знаний, построение обобщенной ФП.

При построении ФП используются нормальные нечеткие множества с верхней границей, равной 1 ($\sup_{x \in E} \mu_A(x) = 1$), причем как унимодальные (например, треугольной или экспоненциальной формы), так и имеющие область толерантности (например, трапецевидные). Среди процедур построения ФП выберем представление с помощью стандартных функций треугольной и трапецевидной форм, оценка параметров которых не вызывает затруднений у экспертов и отвечает специфике неопределенности.

Согласованность экспертной информации оценивается следующими характеристиками [16; 18]:

- матрицей K парной согласованности моделей экспертов;
- матрицей D нечеткости;
- аддитивным k и мультипликативным \tilde{k} показателями.

Первые две характеристики определяют парную согласованность моделей, а последние – согласованность моделей в целом.

Экспертные модели ЛП используются в процессе нечеткого логического вывода решения, что обуславливает высокие требования к адекватности

экспертной информации реальным условиям. Согласованность экспертной информации является одним из критериев ее качества. Низкая согласованность может возникать из-за недостаточной квалификации кого-то из экспертов. Для установления этого факта анализируют матрицы нечеткости D и парной согласованности K моделей и выполняют корректировку согласно алгоритму [16]. Общая несогласованность требует более углубленного анализа модели, положенной в основу формального описания.

Формальное представление зависимостей между выходным и входными параметрами имеет вид эмпирических правил, образующих базу нечетких знаний, в частном случае, множество правил нечетких продукций вида

$$i: A \Rightarrow B; (F),$$

где i – имя нечеткой продукции; $A \Rightarrow B$ – ядро продукции, в котором A – антецедент, включающий элементарные предложения, соединенные логическими связками «и», а B – консеквент, выражающий заключение; \Rightarrow – оператор логического следования; F – коэффициент достоверности продукции². В словесной форме ядро продукции имеет вид «ЕСЛИ A , ТО B ». Для проверки адекватности сформулированных правил строят поверхности, отражающие зависимости выходной ЛП от различных комбинаций входных ЛП, взятых попарно.

В общем случае развернутая форма нечеткого логического вывода для системы продукций имеет вид³

$$\mu_{B'} = \bigvee_{x \in X} (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)). \quad (1)$$

² Там же.

³ Асаи К., Вагада Д., Сугэно С. Прикладные нечеткие системы / пер. с япон. М. : Мир, 1993. 368 с.

На этапе дефаззификации для конкретной комбинации внешних факторов выводятся методом центра тяжести значения выходных параметров⁴. Вывод реализуется в пакете Fuzzy Logic Toolbox (MatLab).

Результаты исследования

На основе систематизации описанных выше этапов и их приложения к исследованию предметной области «предварительная настройка жатвенной части комбайна» предложен метод решения задачи выбора оптимальных начальных значений параметров рабочих органов агрегата. Иерархия составляющих метода включает несколько уровней и приведена на рисунке 1. Далее рассмотрим подробно отдельные элементы данной структурной схемы.

В результате использования метода концептуализации выполняется определение входных и выходных факторов, их отношений и типов данных. Рассматриваются внешние факторы, оказывающие влияние на регулируемые параметры жатвенной части. Среди них наиболее существенными являются урожайность, засоренность, влажность, высота, полеглость, густота, спутанность хлебостоя. При определении лингвистической шкалы ЛП, соответствующих перечисленным факторам, необходимо учитывать тип убираемой культуры. Может потребоваться и дифференциация такого фактора, как урожайность. Так, для пшеницы рассматривают урожайность примерно 60, 50, 40 ц/га и т. д.

Выходными ЛП в поставленной задаче являются скорость машины, положение мотовила по высоте относительно режущего аппарата, положение мотовила по горизонтали (вынос мотовила), высота среза, а также различные

зазоры, такие как зазор между витками шнека и днищем жатки, зазор между пальцами шнека и днищем жатки.

Выбор значений перечисленных входных факторов и выходных параметров является частью общей задачи настройки регулируемых параметров комбайна, схема решения которой представлена на рисунке 2.

Построение модели предметной области включает структурную и параметрическую идентификацию. Структурная идентификация подразумевает установление взаимосвязей регулируемого параметра и внешних факторов на основе эмпирических правил. На этапе параметрической идентификации определяются носители и число термов ЛП, параметры ФП и коэффициенты достоверности правил продукций, при которых расхождение модельных и экспериментальных результатов должно быть минимальным.

Приведем лингвистическое описание нескольких внешних факторов и регулируемых параметров для одной из культур – пшеницы (табл. 1).

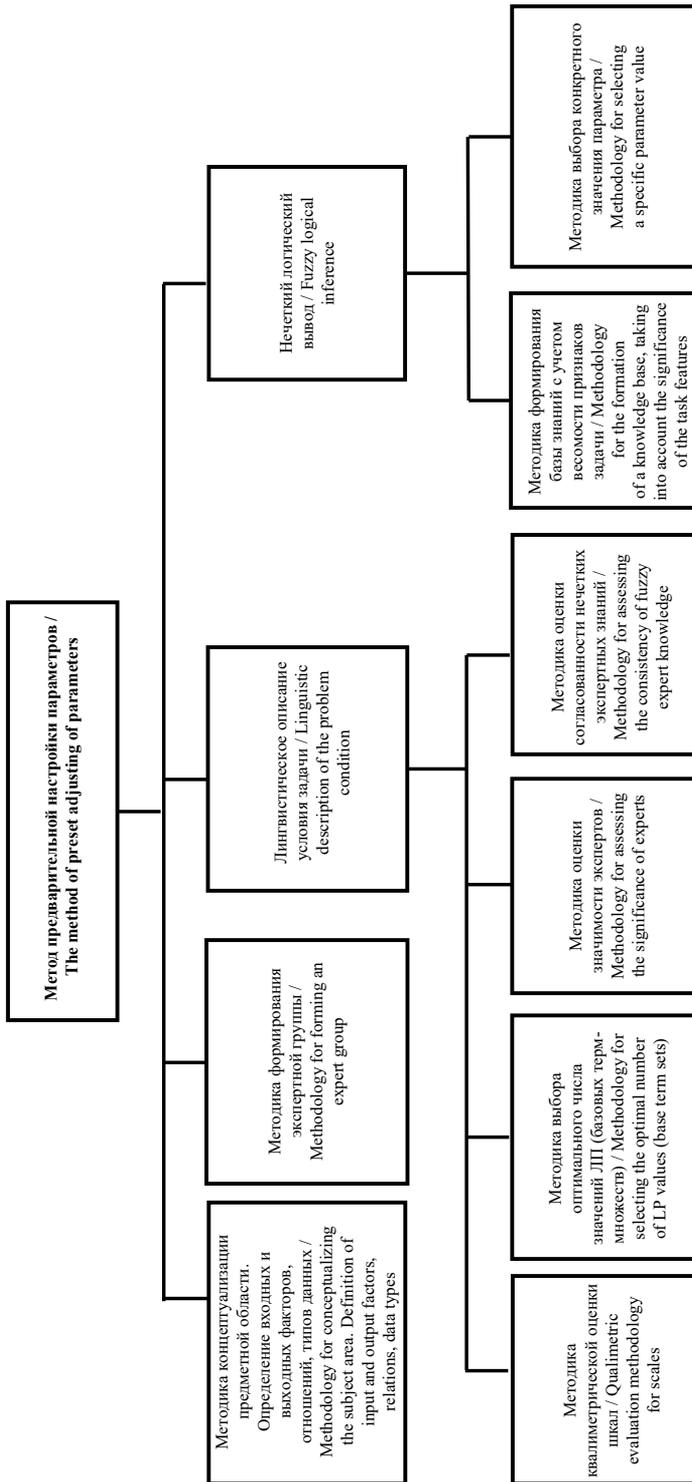
Выбор границ термов проиллюстрирован на рисунке 3 для ЛП «положение мотовила по высоте».

Указано количество термов ЛП, выбранных на основе критериев согласованности при обработке информации четырех экспертов [16]. Характеристики согласованности вычислены с помощью программного комплекса [19] и представлены в таблице 2 для нескольких ЛП.

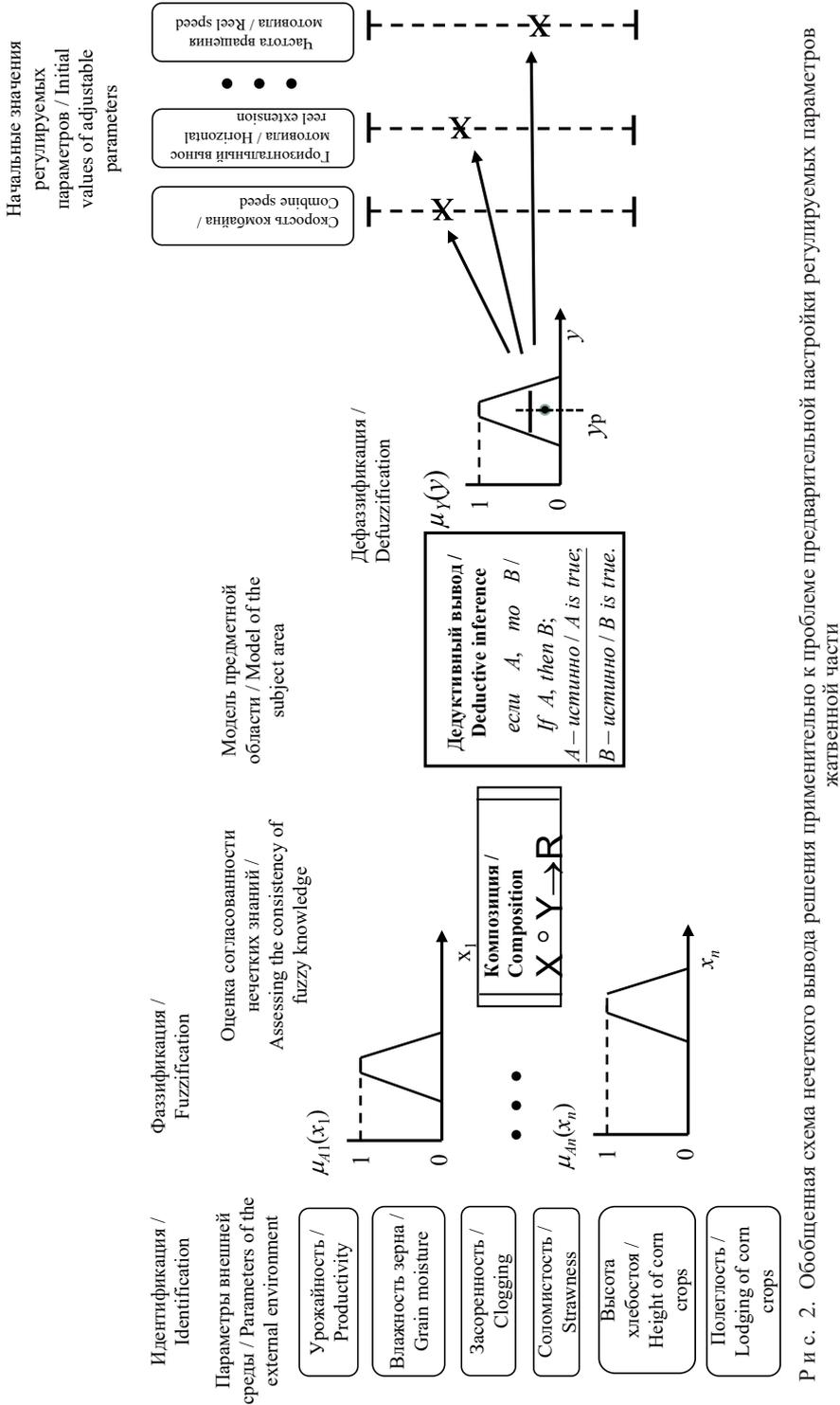
На рисунке 4 приведено несколько графиков ФП рассматриваемых ЛП.

На основе частных ФП построена обобщенная ФП для всех ЛП, которые используются при разработке базы продукционных правил.

⁴ Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.]. Москва : Наука, 2006. 333 с.



Р и с. 1. Структурная схема метода предварительной настройки параметров жатвенной части
 Fig. 1. Block diagram of the preset adjusting method of the combine harvester cutting unit



Р и с. 2. Обобщенная схема нечеткого вывода решения применительно к проблеме предварительной настройки регулируемых параметров жатвенной части

F i g. 2. Generalized scheme of fuzzy inference of the solution in relation to the problem of the adjustable harvester header parameters presetting

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Описание лингвистических переменных
Tuples of the linguistic variables

Кортежи ЛП / Linguistic variable tuples	Условное обозначение / Unit designation
<Урожайность 40 ц/га {Менее 40, Примерно 40, Более 40}, 34–46> / <Productivity of 40 centners/ha {Less than 40, Approximately 40, More than 40}, 34–46>	УР = {УРМ40, УРП40, УРБ40}
<Влажность хлебопоя,% {Сухой; Нормальный, Влажный}, 0–20> / <Humidity of corn crops,% {Dry; Normal, Wet}, 0–20>	ВС = {СХ, НОРХ, ВЛХ}
<Соломистость, % {Малая, Нормальная}, 40–70> / <Strawiness, % {Small, Normal}, 40–70>	СОЛ = {МСОЛ, НСОЛ}
<Засоренность хлебопоя, % {Низкая, Большая}, 0–40> / <Wildage of corn crops, % {Low, Large}, 0–40>	ЗХ = {НЗХ, БЗХ}
<Высота хлебопоя, см {Низкорослый, Ниже среднего, Средний, Высокий}, 30–120> / <Height of corn crops, cm {Low, Below average, Medium, High}, 30–120>	ВысХ = {НХ, НСрХ, СрХ, ВХ}
<Полеглость хлебопоя, % {Прямостоящий, Низкая, Средняя, Высокая}, 0–40> / <Lodging of corn crops, % {Right, Low, Medium, High}, 0–40>	ПХ = {ППХ, НПХ, СПХ, ВПХ}
<Спутанность хлебопоя, % {Нормальный, Спутанный}, 0–40> / <Confusion of corn crops, % {Normal, Confused}, 0–40>	СХ = {НСХ, ССХ}
<Густота хлебопоя, стеб./м ² {Разреженный, Ниже среднего, Средний, Густой}, 100–1 000> / <Density of corn crops, stems/m ² {Fragile, Below average, Medium, Dense}, 100–1,000>	ГХ = {ГРХ, НСрХ, СГХ, ГГХ}
<Положение мотовила по высоте, см {Очень низкое, Низкое, Среднее, Высокое}, –10–110> / <Reel height position, cm {Very low, Low, Medium, High}, –10–110>	МПВ = {ОН, Н, С, В}
<Положение мотовила по горизонтали, см {Незначительный, Ниже среднего, Средний, Дальний}, 20–70> / <Reel horizontal position, cm {Significant, Below average, Medium, Far}, 20–70>	МПГ = {Н, НС, С, Д}

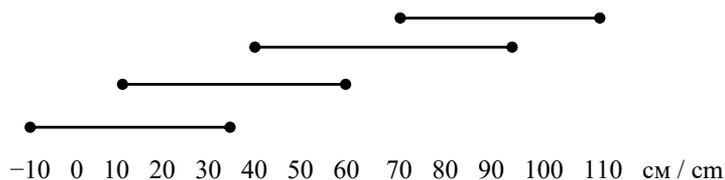
Положение мотовила по высоте / Height position of reel:

–10–35 очень низкое / –10–35 very low

10–60 низкое / 10–60 low

40–95 среднее / 40–95 average

70–110 высокое / 70–110 high



Р и с. 3. Границы термов ЛП «положение мотовила по высоте»

F i g. 3. Limits of the terms of the linguistic variable “Reel vertical position”

Матрица K парной согласованности и показатели k и \tilde{k} общей согласованности
Matrix K of pair consistency and Indices k and \tilde{k} of overall consistency

ЛП / Linguistic Variable	Матрица K / Matrix K				k	\tilde{k}
«Соломистость хлебостоя» / “Strawness of corn crops”	1,000	0,667	0,667	0,964	0,699	0,677
	0,667	1,000	0,946	0,667		
	0,667	0,946	1,000	0,667		
	0,964	0,667	0,667	1,000		
«Высота хлебостоя» / “Height of corn crops”	1,000	0,945	0,901	0,812	0,812	0,812
	0,945	1,000	0,951	0,862		
	0,901	0,951	1,000	0,911		
	0,812	0,862	0,911	1,000		
«Полеглость хлебостоя» / “Lodging of corn crops”	1,000	0,868	0,856	0,929	0,820	0,812
	0,868	1,000	0,912	0,839		
	0,856	0,912	1,000	0,927		
	0,929	0,839	0,927	1,000		
«Густота хлебостоя» / “Density of corn crops”	1,000	0,958	0,896	0,872	0,787	0,779
	0,958	1,000	0,857	0,832		
	0,896	0,857	1,000	0,867		
	0,872	0,832	0,867	1,000		
«Положение мотовила по высоте» / “Reel height position”	1,000	0,868	0,868	0,874	0,850	0,840
	0,868	1,000	1,000	0,747		
	0,868	1,000	1,000	0,747		
	0,874	0,747	0,747	1,000		
«Положение мотовила по горизонтالي» / “Reel horizontal position”	1,000	0,860	0,860	0,892	0,880	0,870
	0,860	1,000	0,960	0,810		
	0,860	0,960	1,000	0,920		
	0,892	0,810	0,920	1,000		

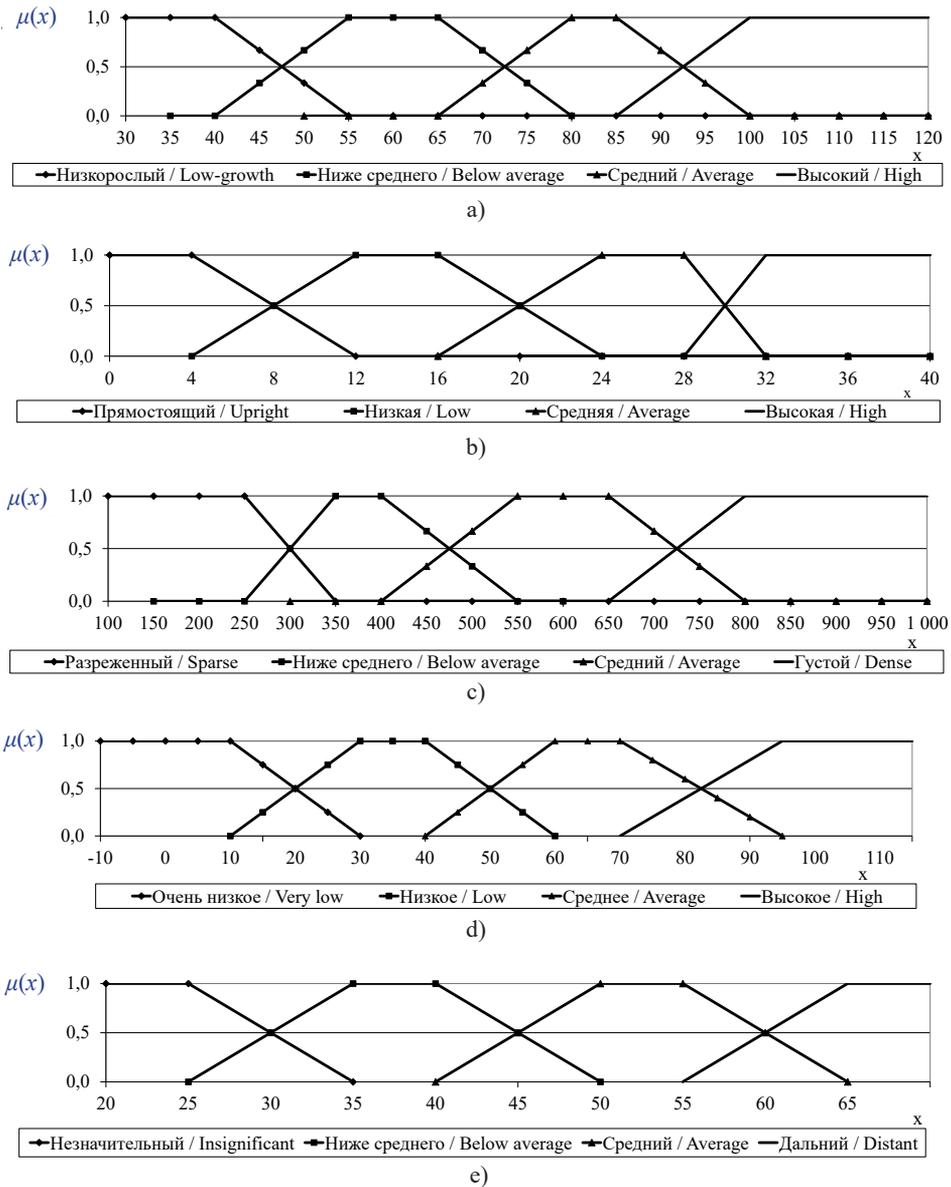
На основе методики формирования базы знаний создана система производственных правил. Она имеет разветвленную иерархическую структуру, которая на первом уровне делится по убираемым культурам, на следующем уровне для ряда культур (например, пшеница) целесообразно выделять урожайность. Систему сложных взаимосвязей входных и выходных параметров, отраженных в правилах, иллюстрирует рисунок 5.

База знаний сформулирована для каждой культуры и регулируемого параметра, коэффициент достоверности правил равен 1. Например, для пшеницы с урожайностью примерно 40 ц/га

и выходной ЛП «положение мотовила по высоте» база знаний содержит 128 правил вида:

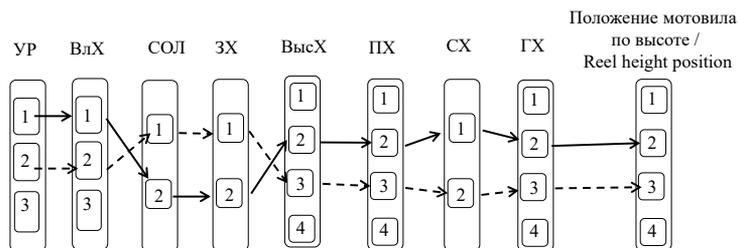
ЕСЛИ <высота хлебостоя «низкорослый», и полеглость хлебостоя «прямостоящий», и спутанность хлебостоя «нормальный», и густота хлебостоя «разреженный», ТО положение мотовила по высоте «очень низкое»>.

Нечеткий логический вывод каждого из регулируемых параметров основан на созданной базе знаний и выполняется согласно формуле (1), а точное его значение для определенной комбинации внешних факторов может быть получено методом центра тяжести.



Р и с. 4. Графики функции принадлежности термов ЛП: а) «Высота хлебостоя»; б) «Полеглость хлебостоя»; с) «Густота хлебостоя»; д) «Положение мотовила по высоте»; е) «Положение мотовила по горизонтали»

F i g. 4. Graphs of membership functions of the terms of the linguistic variables: а) “Height of corn crops”; б) “Lodging of corn crops”; с) “Density of corn crops”; д) “Reel vertical position”; е) “Reel horizontal position”



Р и с. 5. Система взаимосвязей входных ЛП и выходной ЛП «положение мотовила по высоте». Условные обозначения, используемые на рисунке, расшифрованы в таблице 1

F i g. 5. The system of interrelationships of input linguistic variables and output linguistic variable “Reel vertical position”. The symbols used in the figure are shown in Table 1

Обсуждение и заключение

Разработан метод выбора начальных параметров жатвенной части комбайна. В рамках предложенного подхода подробно рассмотрены элементы формально-логической схемы вывода решений. Даны лингвистические описания значимых внешних факторов и параметров настройки, выбраны оптимальные модели на основе показателей согласованности, создана база нечетких экспертных знаний. Полученные результаты, совместно с аналогичными разработками по настройке параметров

других рабочих органов комбайна, составляют основу для дальнейшей разработки интеллектуальной информационной системы принятия решений по предварительной настройке регулируемых параметров комбайна, которая существенно облегчает работу оператора. В перспективе развитие таких систем предполагает подключение датчиков мониторинга внешних условий уборки и показателей качества уборки и автоматизированной системы анализа изображений для оперативной корректировки регулируемых параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ерохин С. Н., Решетов А. С. Потери эффективности уборки зерновых культур в сельхоз-предприятии // Наука в центральной России. 2013. № 1. С. 40–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129807> (дата обращения: 19.08.2022).
2. Способ регулирования параметров зерноуборочного комбайна в процессе уборки : авторское свидетельство 1410892 СССР / Нелюбов А. И. [и др.] № 4159504 ; заявл. 20.11.1986 ; опубл. 23.07.1988. 2 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40483958> (дата обращения: 19.08.2022).
3. Оптимальное регулирование зерноуборочного комбайна (Электронный «Советчик комбайнера») / Е. В. Ветров [и др.] // Труды. 1989. № 4. С. 80–85.
4. Бердышев В. Е. Оптимизация конструктивно-технологических параметров «классической» молотильно-сепарирующей системы зерноуборочного комбайна // Известия нижевожского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 3. С. 175–178. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17954643> (дата обращения: 19.08.2022).
5. Царев Ю. А., Трасковский С. С. Методика определения диапазонов регулирования параметров настройки зерноуборочных комбайнов // Вестник Донского государственного технического университета. 2009. Т. 9, № 4. С. 206–211. URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/1194/1186> (дата обращения: 19.08.2022).

6. Царев Ю. А., Джигарханов Д. Г. Автоматизация системы настройки технологического процесса зерноуборочного комбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 12. С. 29–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13007075> (дата обращения: 19.08.2022).
7. Weed Detecting Robot in Sugarcane Fields Using Fuzzy Real Time Classifier / M. Sujaritha [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. Vol. 134. P. 160–171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.008>
8. Modelling Fuzzy Combination of Remote Sensing Vegetation Index for Durum Wheat Crop Analysis / T. Semeraro [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 156. P. 684–692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.027>
9. Turan I. D., Dengiz O., Ozkan B. Spatial Assessment and Mapping of Soil Quality Index for Desertification in the Semi-Arid Terrestrial Ecosystem Using MCDM in Interval Type-2 Fuzzy Environment [Электронный ресурс] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104933>
10. Prabakaran G., Vaithiyathan D., Ganesan M. Fuzzy Decision Support System for Improving the Crop Productivity and Efficient Use of Fertilizers // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 150. P. 88–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>
11. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field // Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’18). ITI’18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 875. Cham : Springer, 2019. P. 236–245. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
12. Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester / M. Omid [et al.] // Expert Systems with Applications. 2010. Vol. 37, Issue 10. P. 7080–7085. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
13. Fuzzy Control of the Cleaning Process on a Combine Harvester / G. Craessaerts [et al.] // Biosystems Engineering. 2010. Vol. 106, Issue 2. P. 103–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012>
14. Выбор стратегии в задаче корректировки регулировочных параметров комбайна / Л. В. Борисова [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 1. С. 60–75. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>
15. Borisova L. V., Nurutdinova I. N., Dimitrov V. P. Fuzzy Logic Inference of Technological Parameters of the Combine-Harvester // WSEAS Transaction on Systems. 2015. Vol. 14. P. 278–285. URL: <https://wseas.org/multimedia/journals/systems/2015/a525802-095.pdf> (дата обращения: 19.08.2022).
16. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017) (September 27 – October 2 2017). Novi Sad, 2017. P. 319–322. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (дата обращения: 19.08.2022).
17. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Development and Analysis of Fuzzy Expert Data for Technological Adjustment of a Grain Harvester Header [Электронный ресурс] // E3S Web Conf. XIII International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH”. Vol. 175. 2020. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/35/e3sconf_interagromash2020_05027/e3sconf_interagromash2020_05027.html (дата обращения: 19.08.2022).
18. Димитров В. П., Борисова Л. В., Нурутдинова И. Н. Лингвистическое описание процесса технологической настройки сельхозагрегатов // Вестник Аграрной науки Дона. 2017. № 1–1. С. 65–79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29059989> (дата обращения: 19.08.2022).
19. Программная система для ввода экспертных знаний / В. П. Димитров [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11, № 1. С. 83–90. URL: <https://clck.ru/32gQdb> (дата обращения: 19.08.2022).

Поступила 25.08.2022; одобрена после рецензирования 14.11.2022; принята к публикации 21.11.2022

Об авторах:

Димитров Валерий Петрович, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

Борисова Людмила Викторовна, заведующий кафедрой менеджмента и бизнес-процессов Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, borisovalv09@mail.ru

Нурудинова Инна Николаевна, доцент кафедры прикладной математики Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат физико-математических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В. П. Димитров – анализ предметной области, разработка общей методики.

Л. В. Борисова – моделирование нечетких экспертных знаний.

И. Н. Нурудинова – расчет показателей согласованности, выбор оптимальных моделей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Erokhin G.N., Reshetov A.S. Efficiency Losses Harvesting Cereal Crops in Agricultural. *Science in the Central Russia*. 2013;(1):40–44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129807> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Nyelyubov A.I., Gyenkin M.D., Bandurovskiy V.I. [A Way to Regulate the Parameters of a Combine Harvester During Harvesting]. Author's Certificate 1,410,892 USSR. 1988 July 23. 2 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40483958> (accessed 19.08.2022). (In Russ.)
3. Vetrov Ye.V., Chernyavskaya V.P., Bobrineva G.F., et al. [Optimal Adjustment of the Combine Harvester (Electronic "Harvester Adviser")]. *Trudy*. 1989;(4):80–85. (In Russ.)
4. Berdyshev V.Ye. [Optimization of Design and Technological Parameters of the "Classic" Threshing and Separating System of Grain Harvester]. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2012;(3):175–178. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17954643> (accessed 19.08.2022). (In Russ.)
5. Tsarev J.A., Traskovski S.S. Technique of Definition of Control Bands of Parametres of Customisation of Combine Harvesters. *Vestnik of Don State Technical University*. 2009;9(4):206–211. Available at: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/1194/1186> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Tsarev Yu.A., Dzhigarkhanov D.G. Automation of Tuning System of Technological Process for a Grain Combine Harvester. *Traktory i Selkhoz mashiny*. 2009;(12):29–31. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13007075> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Sujaritha M., Annadurai S., Satheeshkumar J., et al. Weed Detecting Robot in Sugarcane Fields Using Fuzzy Real Time Classifier. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017;134:160–171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.008>
8. Semeraro T., Mastroleo G., Pomes A., et al. Modelling Fuzzy Combination of Remote Sensing Vegetation Index for Durum Wheat Crop Analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;156:684–692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.027>
9. Turan I.D., Dengiz O., Ozkan B. Spatial Assessment and Mapping of Soil Quality Index for Desertification in the Semi-Arid Terrestrial Ecosystem Using MCDM in Interval Type-2 Fuzzy Environment. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104933>

10. Prabakaran G., Vaithiyathan D., Ganesan M. Fuzzy Decision Support System for Improving the Crop Productivity and Efficient Use of Fertilizers. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;150:88–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>
11. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent Support of Grain Harvester Technological Adjustment in the Field. In: Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’18). ITI’18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 875. Cham: Springer; 2019. p. 236–245. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
12. Omid M., Lashgari M., Mobli H., et al. Design of Fuzzy Logic Control System Incorporating Human Expert Knowledge for Combine Harvester. *Expert Systems with Applications*. 2010;37(10):7080–7085. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.03.010>
13. Craessaerts G., de Baerdemaeker J., Missotten B., Saeyns W. Fuzzy Control of the Cleaning Process on a Combine Harvester. *Biosystems Engineering*. 2010;106(2):103–111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.012>
14. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P., et al. Selecting a Strategy for Determining the Combine Harvester Parameter Settings. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(1):60–75. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.060-075>
15. Borisova L.V., Nurutdinova I.N., Dimitrov V.P. Fuzzy Logic Inference of Technological Parameters of the Combine-Harvester. *WSEAS Transaction on Systems*. 2015;14:278–285. Available at: <https://wseas.org/multimedia/journals/systems/2015/a525802-095.pdf> (accessed 19.08.2022).
16. Borisova L., Dimitrov V., Nurutdinova I. Algorithm for Assessing Quality of Fuzzy Expert Information. In: Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017) (September 27 – October 2 2017). Novi Sad; 2017. p. 319–322. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110107/> (accessed 19.08.2022).
17. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Development and Analysis of Fuzzy Expert Data for Technological Adjustment of a Grain Harvester Header. In: E3S Web Conf. XIII International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH”. Vol. 175. 2020. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/35/e3sconf_interagromash2020_05027/e3sconf_interagromash2020_05027.html (accessed 19.08.2022).
18. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. [Linguistic Description of the Process of Technological Adjustment of Agricultural Aggregates]. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017;(1–1):65–79. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29059989> (accessed 19.08.2022). (In Russ.)
19. Dimitrov V.P., Borisova L.V., Nurutdinova I.N. Program System for Expert Knowledge Input. *Vestnik of Don State Technical University*. 2011;11(1):83–90. Available at: <https://clck.ru/32gQdb> (accessed 19.08.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 25.08.2022; approved after reviewing 14.11.2022; accepted for publication 21.11.2022

About the authors:

Valeriy P. Dimitrov, Head of the Chair of Quality Management, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674>, Researcher ID: E-4908-2018, Scopus ID: 57195505958, kaf-qm@donstu.ru

Lyudmila V. Borisova, Head of the Chair of Management and Business Processes, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6611-4594>, Researcher ID: E-4863-2018, borisovalv09@mail.ru

Inna N. Nurutdinova, Associate Professor of Applied Mathematics Chair, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), Cand.Sci (Phys.-Math.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-1295>, nurut.inna@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. P. Dimitrov – analysis of the subject area, development of a general methodology.

L. V. Borisova – modeling of fuzzy expert knowledge.

I. N. Nurutdinova – calculation of consistency indicators, selection of optimal models.

All authors have read and approved the final manuscript.



Эффективность применения шин низкого давления при возделывании озимого ячменя

Е. В. Труфляк , М. С. Бухарцев, Д. А. Сотников
Кубанский ГАУ (г. Краснодар, Российская Федерация)
 trufliak@mail.ru

Аннотация

Введение. Отсутствие комплексного анализа влияния шин низкого давления на рост и развитие зерновых культур (размерно-массовые характеристики различных частей растений, болезни и т. д.), урожайность по следу и вне следа с использованием наземных измерений, снимков с беспилотного летательного аппарата и из космоса остается актуальной проблемой. Цель работы – определить с использованием цифровых технологий, дистанционных и наземных измерений, на какой из элементов структуры урожая и на каком этапе оказывает наибольшее влияние давление в шинах при возделывании озимого ячменя.

Материалы и методы. Наземный мониторинг всходов проводился с использованием стандартных методик полевого опыта. Дистанционный мониторинг всходов выполнялся в течение вегетации озимого ячменя беспилотными летательными аппаратами (Phantom 4 Pro, Mavic 2 Enterprise Dual) и космоснимками (системы OneSoil, SkyScout).

Результаты исследования. В результате проведенного в течение одного года исследования доказана эффективность применения шин низкого давления при возделывании озимого ячменя. При сравнении эффективности использования шин низкого давления с шинами стандартного давления получили повышение биологической урожайности на 4,4 %, комбайновой – на 9,5 %.

Обсуждение и заключение. Определено, что давление в шинах оказывает влияние на рост и развитие озимого ячменя, развитие болезней, а также урожайность. При этом заметна разница показателей при движении шины по следу и вне следа. Таким образом, важным вопросом интенсификации сельскохозяйственного производства, наряду с использованием современных технологий и технических средств, высокопродуктивных сортов и гибридов, средств защиты растений, является использование шин низкого давления.

Ключевые слова: шины, низкое давление, озимый ячмень, урожайность, опыт, контроль

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 20.1/73 и договора НИР от 15.09.2021 г. № 128а/21.

Благодарности: выражаем благодарность участникам эксперимента: директору ООО «Агро-Софт» А. А. Тенкову, заведующему кафедрой физики Кубанского ГАУ Н. Ю. Курченко, доценту кафедры физиологии и биохимии растений Кубанского ГАУ Ю. В. Подушину, директору ООО «АИС» В. Е. Кухряню.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Труфляк Е. В., Бухарцев М. С., Сотников Д. А. Эффективность применения шин низкого давления при возделывании озимого ячменя // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 567–587. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.567-587>

Original article

Efficiency of Low-Pressure Tires in the Cultivation of Winter Barley

E. V. Truflyak ✉, M. S. Bukhartsev, D. A. Sotnikov
Kuban SAU (Krasnodar, Russian Federation)

✉ truflyak@mail.ru

Abstract

Introduction. Today, a pressing problem is the lack of a comprehensive analysis of the impact of low-pressure tires on the growth and development of crops (dimension and mass characteristics of different plant parts, diseases, etc.), yield within the track and off the track using ground-based measurements, images from drones and from space. The aim of the work is to determine, using digital technology, remote and ground-based measurements, which element of yield structure and at which stage is most affected by tire pressure during the cultivation of winter barley.

Materials and Methods. Above-ground monitoring of sprouts was carried out using standard methods of field testing. Remote monitoring of sprouts was carried out during the vegetation of winter barley by an unmanned aerial vehicle (Phantom 4 Pro, Mavic 2 Enterprise Dual) and by satellite images (OneSoil, SkyScout systems).

Results. As a result of one year research the efficiency of low-pressure tires application in the cultivation of winter barley was proved. The results of comparing the efficiency of low-pressure tires with standard pressure tires show that when using low-pressure tires the biological yield increases by 4.4% and combine yield increases by 9.5%.

Discussion and Conclusion. It was determined that tire pressure affects the growth and development of winter barley, the development of diseases, and crop yields. At the same time, the difference in indicators when the tire moves within the track and off the track is noticeable. Thus, the use of low pressure tires is an important issue of agricultural production intensification just like the use of modern technologies and technical means, highly productive varieties and hybrids, and plant protection means.

Keywords: tires, low pressure, winter barley, yield, experience, control

Funding: The study was financially supported by the Kuban Scientific Foundation within the framework of the Scientific Project no. 20.1/73 and the Research Contract no. 128a/21 from 15.09.2021.

Acknowledgements: We express our gratitude to the participants of the experiment: A. A. Tenekov, Director of Agro-Soft LLC, N. Yu. Kurchenko, Head of the Chair of Physics of Kuban State Agrarian University, Y. V. Podushin, Associate Professor of Plant Physiology and Biochemistry of Kuban State Agrarian University, V. E. Kurian, Director of AIS LLC.

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

For citation: Truflyak E.V., Bukhartsev M.S., Sotnikov D.A. Efficiency of Low-Pressure Tires in the Cultivation of Winter Barley. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):567–587. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.567-587>

Введение

Повышение урожайности зерновых колосовых культур является важной задачей продовольственной безопасности страны. В настоящее время невозможно получать хорошие результаты без использования мощных тракторов и широкозахватных сельскохозяйственных машин, давление шин которых оказывает влияние на урожайность возделываемых культур.

Актуальным вопросом является изучение возможности повышения урожайности зерновых колосовых культур за счет использования шин низкого давления.

Цель работы – определить с использованием цифровых технологий, дистанционных и наземных измерений, на какой из элементов структуры урожая и на каком этапе оказывает наибольшее влияние давление в шинах при возделывании озимого ячменя.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Выбор поля, опытного и контрольного экспериментальных участков.
2. Анализ зон продуктивности, агрохимического обследования почв, урожайности культур поля до проведения эксперимента.
3. Обоснование границ и размеров опытного и контрольного экспериментальных участков.
4. Подготовка агрегатов, обоснование и контроль давления шин, сопровождение технологических операций дискования стерни, отбора проб почвы, внесения удобрений, дискования после внесения удобрений, посева, прикатывания посева, внесения жидких удобрений, внесения гербицидов и фунгицидов.
5. Проведение наземного и дистанционного мониторинга всходов в течение вегетации озимого ячменя.
6. Анализ результатов исследований.

Обзор литературы

В университете Харпера Адамса (Великобритания) изучалось влияние способа движения и обработки почвы на урожайность озимой пшеницы и свойства почвы [1]. Целью данного исследования являлась обработка с произвольным движением (RTF); использованием низкого давления на грунт (LGP); обработка контролируемым движением (CTF) с различными системами обработки почвы. Рост и урожайность сельскохозяйственных культур изучали с помощью анализа фотографий и собранного урожая. CTF увеличил урожайность во всех системах обработки почвы.

Целью исследования в другой работе было определение влияния гусениц и шин на физические свойства почвы [2]. Сравнили влияние резиновых гусениц (Challenger 765C), стандартных шин и шин LGP (Massey Ferguson 8480). Стандартные шины и шины LGP были накачаны до высокого давления (1,2 бар спереди; 1,5 бар сзади) и низкого давления накачки (0,7 бар спереди и сзади). Давление почвы измерялось с помощью тензометрических датчиков давления на глубине 300 мм в центре колеса. Данные были собраны с использованием системы National Instruments CompactRIO и зарегистрированы с помощью программного обеспечения Virtual Instrument на портативном ПК. Физические свойства почвы определялись с помощью конусного пенетрометра. Пиковое давление почвы под резиновыми гусеницами (0,27 бар) было значительно ниже.

Изучено влияния глубокой, мелкой и нулевой обработки почвы с обычным и низким давлением в шинах и регулируемые системы движения на урожайность озимой пшеницы, озимого ячменя и ярового овса. Результаты показывают, что урожайность при нулевой обработке почвы была ниже, чем при глубокой и мелкой обработке почвы

для всех культур с общим снижением на 1,0 т/га ниже среднего значения при глубокой и мелкой обработке почвы [3].

Системы низкого давления на грунт (LGP) могут способствовать случайному перемещению и часто используются для доступа к полям во время влажных условий, сводя к минимуму негативные последствия дорожного движения. Междисциплинарный долгосрочный проект, созданный в Университете Харпера Адамса (Великобритания) в октябре 2011 года, изучал воздействие дорожного движения и обработки на реакцию почвы, урожая и энергии в рандомизированном и повторном исследовании для определения влияния случайного движения (RTF), управляемого движения (CTF) и низкого давления на грунт (LGP) системы с глубокой, мелкой и нулевой обработкой почвы. Целью этого исследования является разработка интегрированной системы механизации для оптимизации почвенных и водных ресурсов, роста урожая, урожайности, производительности системы и экономики в коммерческой сельскохозяйственной практике [4].

В диссертации Э. К. Смит представлены обобщенные материалы по влиянию сельскохозяйственного транспорта и обработки почвы на физические свойства почвы и урожай¹.

В. А. Русанов в монографии и В. Ю. Ревенко в диссертации рассмотрели вопросы почвенного уплотнения, а также пути его устранения².

Рассмотрены задачи разработки конструкции опорного колеса с широкопрофильной шиной переменного давления, проведен анализ и моделирование различных широкопрофильных конструкций шин опорных колес [5; 6].

Теоретически обосновано использование крупногабаритных шин низкого давления [7].

К. А. Зеленов в диссертации рассмотрел работу трактора ЛТЗ-155 и плуга ПЛН-5-35 с шинами низкого давления и пришел к выводу, что они позволяют снизить буксование и улучшить тяговые свойства³.

Компания «Авион» в 2016 г. совместно с Воронежским ГАУ исследовала влияние шин сверхнизкого давления на урожайность и качество озимой пшеницы⁴. В результате получено, что уровень снижения урожайности зависит от фазы развития растений. В фазу кущения снижение урожайности растений по следу колес не происходило. Растения, примятые колесами машины в фазу трубкования и колошения, дают урожай, но на 11 и 29 % ниже контроля.

Показано, как влияет на ходовую часть в тракторах низкое давление в шинах, предложены пути повышения эксплуатационных качеств машин⁵ [8].

Ю. Н. Сыромятников резюмирует, что один из самых простых и эффективных способов снизить давление трактора на почву – уменьшение давления в шинах [9].

¹ Smith E. K. The Effect of Agricultural Traffic and Tillage on Soil Physical Properties and Crop Yields : A thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Newport, 2017. 242 p. URL: <https://hau.repository.guildhe.ac.uk/id/eprint/17337/> (дата обращения: 10.09.2022).

² Русанов В. А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения : моногр. М. : ВИМ, 1998. 368 с. ; Ревенко В. Ю. Повышение эффективности машинно-тракторных агрегатов с колесными тракторами классов 1,4, 2 и 3 на основе оптимизации параметров движителей : дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2006. 182 с.

³ Зеленов К. А. Повышение тягово-сцепных свойств колесных полноприводных тракторов регулированием давления воздуха в шинах : дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2003. 178 с.

⁴ Мязин Н. Г. Исследование о влиянии шин сверхнизкого давления на урожайность и качество озимой пшеницы [Электронный ресурс]. URL: https://avion-agro.ru/research_articles?mode=view&post_id=1490286 (дата обращения: 10.09.2022).

⁵ Ходовые системы тракторов / В. М. Забродский [и др.]. М. : Агропромиздат, 1986. 269 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001335506> (дата обращения: 10.09.2022).

Предложено устройство, позволяющее производить автоматическое изменение давления в шинах [10]. Представлен анализ и алгоритм воздействия ходовых систем на почву⁶.

Влияние ходовых систем на почву освещено и в других статьях [11–14]. Испытаниям шин низкого и сверхнизкого давления посвящены работы⁷ [15; 16].

А. А. Лопарев еще в 1984 г. изучал влияние факторов ходовых систем тракторов тягового класса 1,4 на свойства дерново-подзолистых суглинистых почв⁸. Комплексные результаты расширенного исследования отражены в его диссертации⁹. Однако за прошедшие 20 лет мировые производители шин выпустили новые модели, которые используются в различных почвенно-климатических условиях. Появились новые высокоточные дистанционные цифровые инструменты, которые были не доступны ранее. При этом проведены исследования только для тракторов тягового класса 1,4 на дерново-подзолистых суглинистых почвах.

Обзор литературных источников, связанных с использованием шин низкого давления, показывает актуальность изучения данного вопроса как научно-образовательными организациями, так и производителями шин. Выполняются теоретические и экспериментальные

исследования в России и за рубежом применительно к возделыванию сельскохозяйственных культур. Однако отсутствует глубокий комплексный анализ влияния шин низкого давления, установленных на тракторах различных мощностей, на рост и развитие культур (размерно-массовые характеристики различных частей растений, развитие болезней и т. д.) по следу и вне следа с использованием наземных измерений, снимков с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и из космоса.

Материалы и методы

Эксперимент по оценке эффективности применения шин низкого давления MICHELIN AXIOBIB2, технологии изготовления MICHELIN Ultraflex при возделывании озимого ячменя проводился на поле 155 га в Гиагинском районе Республики Адыгея с 12 октября 2021 г. по 4 июля 2022 г.

Предварительно перед выбором поля выполнен анализ интегральных зон поля с 21.03.2013 г. в платформе SkyScout. Всего рассмотрено 1090 снимков, отобрано 82. В системе OneSoil выполнен анализ зон продуктивности с 2016 по 2021 гг.

Анализируя интегральные зоны и зоны продуктивности, можно заметить их примерное совпадение.

⁶ Козлов Д. Г., Остриков В. В. Анализ путей снижения негативного влияния колесных движителей на физико-механические свойства почвы и тяговые качества трактора // Наука и образование в современных условиях : мат. междунар. науч. конф. Воронеж, 2016. С. 230–241. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26102667> (дата обращения: 10.09.2022).

⁷ Щеголихина Т. А., Гольяпин В. Я. Самоходные энергетические средства для внесения удобрений и средств защиты растений на шинах низкого давления // Инженерные решения для агропромышленного комплекса : мат. Всерос. науч.-практ. конф. Рязань : Изд-во РГАУ, 2022. С. 196–201. URL: http://www.rgatu.ru/archive/sborniki_konf/24_03_22/programma.pdf (дата обращения: 10.09.2022); Анкин Н. В., Дорофеева К. А. Основные преимущества использования шин низкого давления в агропромышленном комплексе // Перспективные технологии в современном АПК России: традиции и инновации : мат. 72 Междунар. науч.-практ. конф. Рязань : Изд-во РГАУ, 2021. С. 115–118.

⁸ Лопарев А. А. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов ходовой систем тракторов МТЗ-80, МТЗ-82 на свойства дерново-подзолистых суглинистых почв : дис. ... канд. техн. наук. Киров, 1984. 241 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003435726> (дата обращения: 10.09.2022).

⁹ Лопарев А. А. Повышение эффективности колесных универсально-пропашных тракторов тягового класса 1,4 в растениеводстве путем совершенствования конструктивных параметров движителей и оптимизации технологических режимов : дис. ... д-ра. техн. наук. Киров, 2003. 475 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002624033> (дата обращения: 10.09.2022).

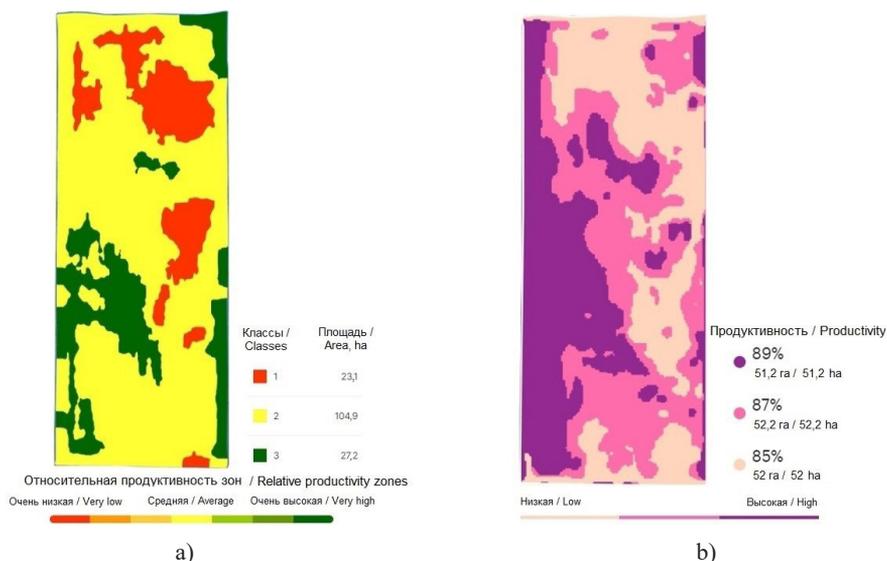
Однако в системе SkyScout они занимают 27,2 га, а в системе OneSoil 51,2 га.

Выполнена обрисовка зон высокой продуктивности платформ SkyScout и OneSoil в системе КОМПАС 3D и их наложение друг на друга (рис. 1).

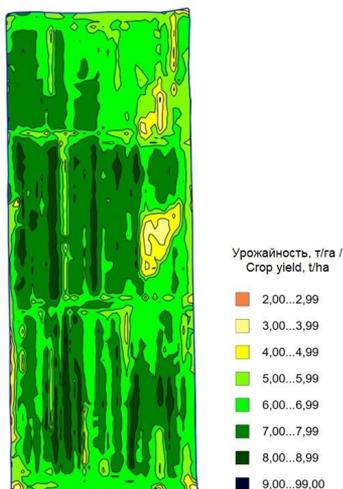
Анализируя результаты картирования урожайности озимой пшеницы за 2020 г., сделан вывод, что варьирование

в зоне высокой продуктивности составляет от 7 до 9 т/га, низкой 3–6 т/га (рис. 2).

По результатам агрохимобследования до проведения экспериментальных исследований на поле содержание калия и фосфора в зоне продуктивности высокое, кроме нижней левой части для калия (рис. 3).



Р и с. 1. Зоны экспериментального поля: а) интегральные; б) продуктивности
F i g. 1. Zones of the experimental field: а) integral; б) productivity



Р и с. 2. Карта урожайности пшеницы озимой (2020 г., данные ООО «Агро-Софт»)
F i g. 2. Map of winter wheat yield (2020, data of Agro-Soft LLC)

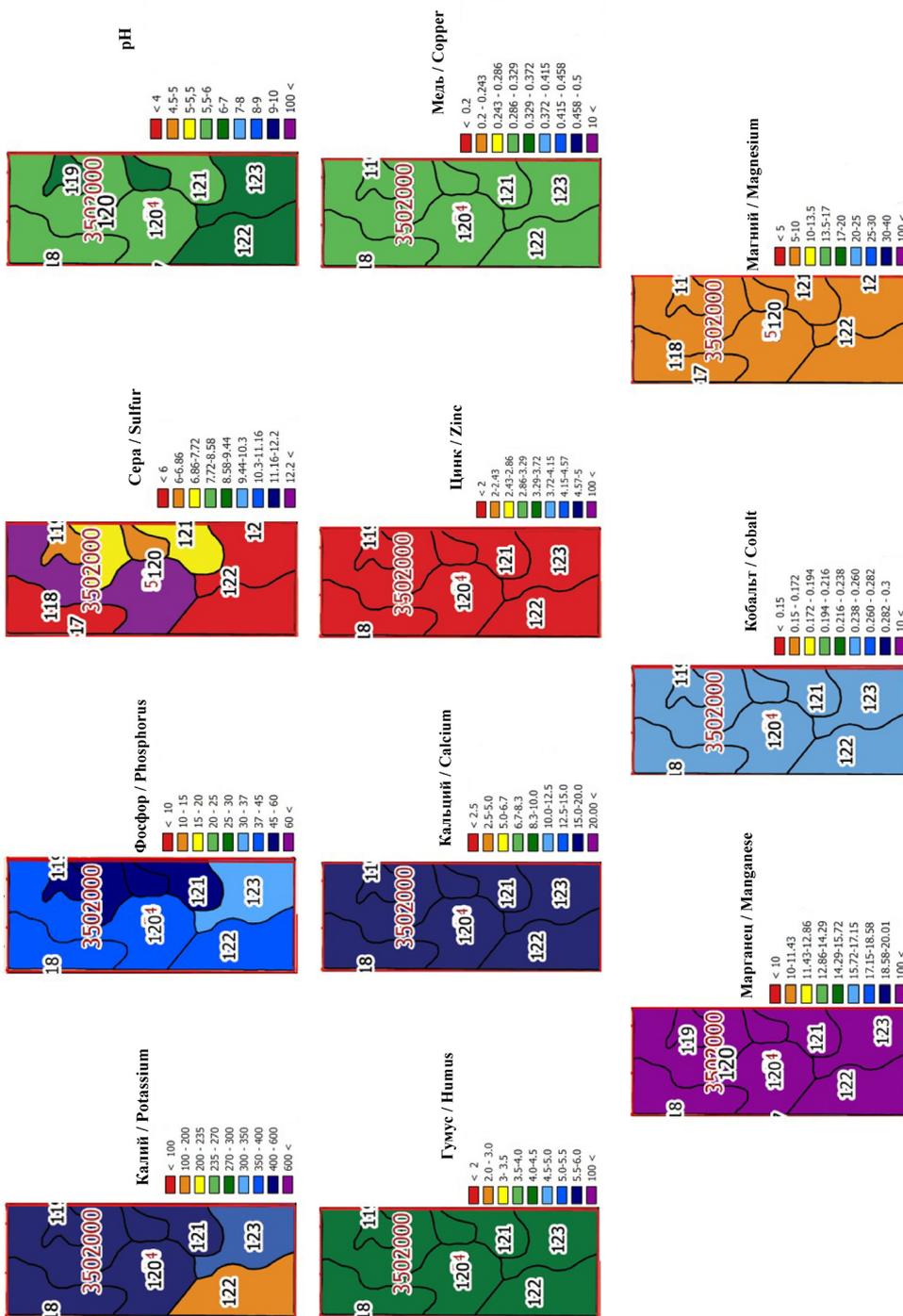


Рис. 3. Результаты агрохимобследования до проведения эксперимента (данные ООО «Агро-Софт») / Fig. 3. Results of agrochemical survey before the experiment (data of LLC «Agro-Soft»)

В целом по полю значение марганца очень высокое, кобальта повышенное, кальция высокое, гумуса среднее, меди среднее, магния низкое, цинка очень низкое.

Проведя предварительную аэрофотосъемку, заметили наличие вымочек (рис. 4), которые так же были видны на космоснимках при анализе вегетации за предыдущие годы.

В результате поле разделили на части так, чтобы опыт 43 га (использовались шины низкого давления) и контроль 43 га (использовались шины стандартного давления) были в однородной зоне, а неоднородный участок не задействовали в эксперименте (рис. 5).

Для обоснования давления в шинах на опыте трактор с сельхозмашиной перед каждой технологической операцией взвешивался (рис. 6).

Осуществлялись следующие технологические операции (рис. 7):

– дискование стерни (трактор John Deere 9520 и дисковая борона John Deere-650 (2.10.2021 г.): шины не участвовали в эксперименте);

– внесение удобрений (трактор John Deere 7830 и разбрасыватель удобрений

Amazone ZA-TS 3200 (13.10.2021 г.): давление шин (опыт) $P_o = 1$ бар; давление шин (контроль) $P_k = 1,6$ бар);

– дискование после внесения удобрений (трактор John Deere 8430 и дисковая борона Lemken Rubin 9 (13.10.2021 г.): $P_o = 0,6$ бар; $P_k = 1,4$ бар);

– посев (трактор John Deere 7830 и сеялка John Deere 9400 (с 17.10.2021 по 18.10.2021 г.): $P_o = 0,6$ бар; $P_k = 1,2$ бар);

– прикатывание посевов (трактор John Deere 7830 и каток Cambridge CV500P (20.10.2021 г.): $P_o = 0,6$ бар; $P_k = 0,6$ бар; обработка производилась по диагонали поля);

– внесение жидких удобрений (опрыскиватель John Deere 4730 (27.02.2022 г.): $P_o = 0,6$ бар (передние); $P_o = 0,8$ бар (задние); $P_k = 1,4$ бар (передние); $P_k = 1,4$ бар (задние));

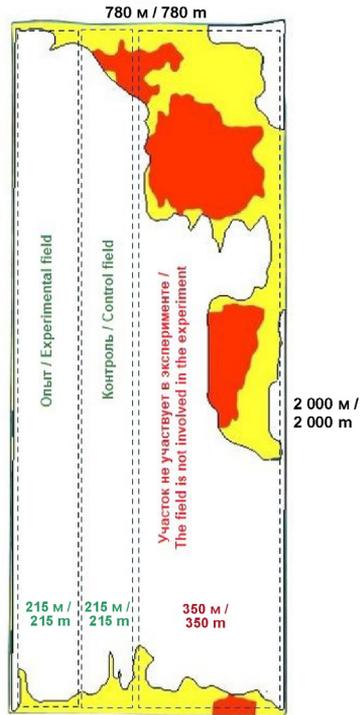
– внесение гербицидов и фунгицидов (опрыскиватель John Deere 4730: $P_o = P_k = 2,5$ бар).

Выполнялись наземные измерения количества и высоты растений; количества листьев в растении; массы растения; длины и ширины корневой системы; показания N-тестера и индекса NDVI; поражения растений болезнями и др.



Р и с. 4. Рельефные участки экспериментального поля (мочаки)

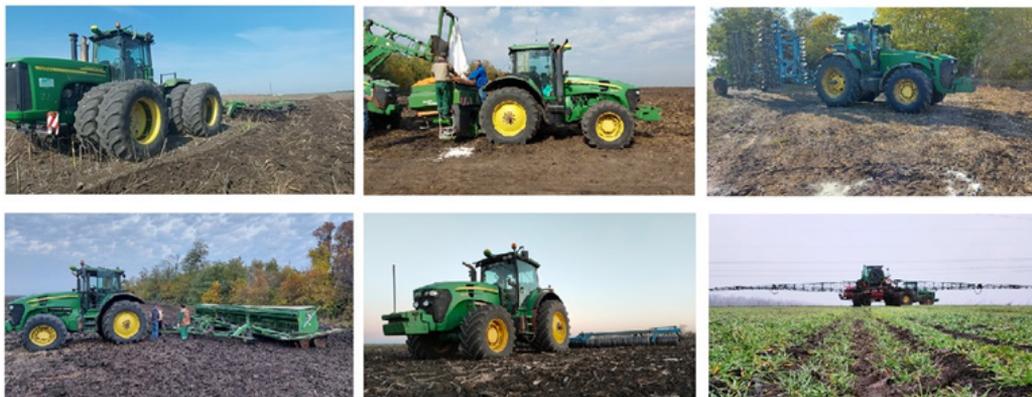
F i g. 4. Relief areas of the experimental field (flooded areas)



Р и с. 5. Экспериментальное поле
F i g. 5. Experimental field



Р и с. 6. Взвешивание агрегата John Deere 8430 + Lemken Rubin 9
F i g. 6. Weighing of John Deere 8430 + Lemken Rubin 9



Р и с. 7. Технологические операции слева направо: первый ряд – дискование стерни; внесение удобрений; дискование после внесения удобрений; второй ряд – посев; прикатывание посевов; внесение жидких удобрений

F i g. 7. Technological operations from left to right: first row is disking stubble field; fertilizer application; disking after fertilizer application; second row is seeding; rolling; spreading liquid fertilizer

Дистанционно с использованием БПЛА Phantom 4 Pro и Mavic 2 Enterprise Dual производилась съемка полей для получения ортофотоплана и биоиндекса.

Космоснимки систем OneSoil и Sky-Scout позволяли в целом анализировать вегетацию на всем поле, изменение индекса вегетации, созревание культуры.

Результаты исследования

Сравним основные размерно-массовые характеристики растений в процессе их вегетации на опыте и контроле по следу.

Измерения производились в фазах всходов 2–3 листьев (17.11.2021 г.); начала кушения (22.12.2021 г.); кушения (25.02.2022 г.); колошения (5.04.2022 г.); молочной спелости (20.05.2022 г.). В таблице 1 представлены только среднеарифметические значения исследуемых показателей по данным фазам (результаты статистических данных не представлены из-за большого объема информации).

Можно видеть в опыте по следу следующие результаты:

– количество растений: увеличение на 27 % (17.11.2021 г.), снижение на 12 % (22.12.2021 г.), увеличение на 3 % (5.04.2022 г.);

– высота растений: увеличение на 14 % (17.11.2021 г.), снижение на 4 % (22.12.2021 г.), увеличение на 4 % (5.04.2022 г.);

– количество листьев в растении: больше на 14 % (22.12.2021 г.), на 3 % (5.04.2022 г.);

– масса растения: рост на 18 % (25.02.2022 г.);

– длина корневой системы: больше на 8 % (22.12.2021 г.), меньше на 2 % (5.04.2022 г.);

– ширина корневой системы: выше на 57 % (22.12.2021 г.), ниже на 13 % (5.04.2022 г.);

– показания N-тестера: выше на 5 % (17.11.2021 г.), на 3 % (22.12.2021 г.); ниже на 4 % (25.02.2022 г.);

– показания NDVI: больше на 7 % (22.12.2021 г.), на 4 % (25.02.2022 г.);

– доля листьев, пораженных ринхоспориозом: ниже на 38 % (25.02.2022 г.);

– раскущенность: больше на 36 % (22.12.2021 г.), больше в 2,9 раза (25.02.2022 г.), меньше на 16 % (5.04.2022 г.).

На контрольном участке распространение сетчатой пятнистости на небольшом удалении от колеи составило 51 %,

а развитие 13 % (данные Ю. В. Подушина). На опытном участке распространение 95 %, развитие 32 %. Различия между вариантами по распространению и развитию сетчатого септориоза были существенными. В опыте распространение инфекции было на 44 % выше, чем в контроле; развитие пятнистости – на 19 %. Развитие инфекции в обоих случаях не превышало экономический порог вредоносности.

Рассматривали проективное покрытие в соответствующих точках измерений в фазе начало кушения (22.12.2021 г.). Показатель проективного покрытия по следу на опытном участке выше, чем на контрольном, на 55 %; вне следа на опыте так же выше, чем на контроле на 50 % (табл. 1, рис. 8). При этом наблюдается высокая вариация признака на контроле (более 20 %) и высокая ошибка (более 7–8 %).

Т а б л и ц а 1

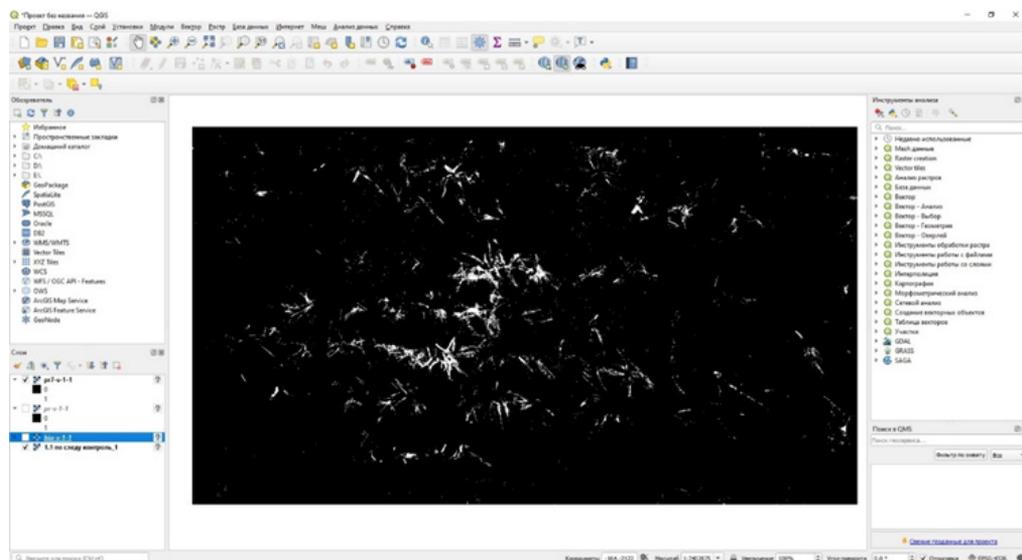
Table 1

Сводные результаты
Summary results

Показатель / Indicator	Опыт / Experience		Контроль / Control	
	по следу / within the track	вне следа / off the track	по следу / within the track	вне следа / off the track
1	2	3	4	5
Количество растений, шт. / Number of plants, pcs:				
17.11.2021 (1 м ²)	200	172	157	210
22.12.2021 (1 п. м.)	25	32	28	30
5.04.2022 г (1 п. м.)	31	28	30	20
Высота растений, мм / Plant height, mm:				
17.11.2021	66	67	58	64
22.12.2021	112	134	117	106
5.04.2022	201	223	193	207
Проективное покрытие (22.12.2021) / Projective cover (22.12.2021)	0,031	0,036	0,020	0,024
Количество листьев в растении, шт. / Number of leaves in the plant, pcs:				
22.12.2021	4,0	3,7	3,5	3,8
5.04.2022	22,2	25,0	21,5	24,4
Масса растения, г / Weight of the plant, g:				
22.12.2021	0,3	0,4	0,3	0,35
25.02.2022	1,88	1,82	1,6	1,93
Длина корневой системы, мм / Root system length, mm:				
22.12.2021	77	83	71	73
5.04.2022	112	112	114	118
Ширина корневой системы, мм / Root system width, mm:				
22.12.2021	4,7	4,6	3,0	3,4
5.04.2022	7,6	8,2	8,6	9,0

Окончание таблицы 1 / End of table 1

1	2	3	4	5
Показания N-тестера, ед. / N-tester indications, units:				
17.11.2021	461	488	437	446
22.12.2021	528	581	515	484
25.02.2022	578	611	604	622
Показания NDVI / NDVI indications:				
22.12.2021	0,15	0,15	0,14	0,15
25.02.2022	0,49	0,53	0,47	0,52
Доля листьев, пораженных ринхоспориозом, % (25.02.2022) / Share of leaves affected by rhinchosporiosis, % (25.02.2022)				
	2,9	1,8	4,0	1,3
Раскущенность, шт. / Spread, pcs:				
22.12.2021	1,9	1,9	1,4	1,4
25.02.2022	4,6	4,3	1,6	1,9
5.04.2022	4,4	5,0	5,1	5,6



Р и с. 8. Проективное покрытие в точке 1 (данные В. Е. Курьян)

F i g. 8. Projective cover in point 1 (data of V. E. Kuryan)

Определяли вегетацию озимого ячменя по космоснимкам в системе OneSoil с 7 января по 25 апреля 2022 г. в безоблачные дни (рис. 9). Далее происходило снижение индекса вегетации. До 24 февраля виден рост вегетации по

опыту на 3–6 %, а затем вегетация одинаковая.

С 12 мая происходит созревание урожая – индекс NDVI начинает снижаться, поэтому дальше не сравниваем вегетацию.

На 11.06.2022 г. средний NDVI по опыту 0,48; по контролю 0,49 (в среднем по всему полю 0,48), то есть созревание на опыте происходит быстрее на 2 %; неоднородность NDVI по опыту 0,05; по контролю 0,03 (в среднем 0,05), то есть неоднородность выше на опыте.

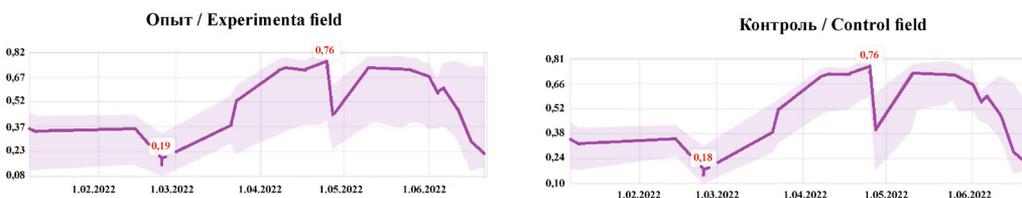
На 16.06.2022 г. средний NDVI по опыту 0,29; контроль 0,28, то есть созревание на контроле происходит быстрее на 4 %; неоднородность NDVI по опыту 0,08; по контролю 0,03, то есть неоднородность выше на опыте.

Отбор проб почвы осуществлялся 13.10.2021 г. автоматизированным пробоотборником (рис. 10) с перемещением по заданным координатам (рис. 11).

Представлены данные по показателям, гранулометрическому составу почвы, низкой обеспеченности почвы элементами питания (табл. 2, рис. 12).

Урожайность озимого ячменя определялась 3 способами: биологическим, комбайновым (данные с весовой) и с использованием картирования урожайности комбайна.

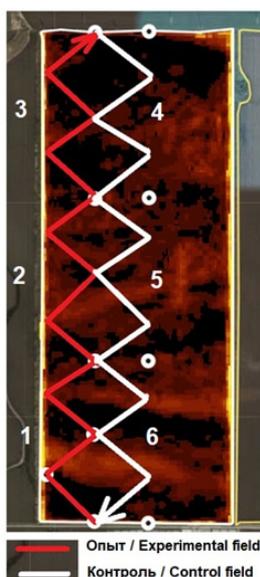
Биологическая урожайность определялась 29.06.2022 г. путем среза всей массы в рамке площадью 1 м² (размер 0,7×1,43 м по ширине колеи). Срезы производились в шести точках по следу и шести точках вне следа на опытном и контрольном участках (рис. 12).



Р и с. 9. Динамика индекса вегетации по опытному и контрольному полям
F i g. 9. Dynamics of vegetation index in experimental and control fields



Р и с. 10. Автоматизированный пробоотборник (ООО «Агро-Софт»)
F i g. 10. Automated sampler (LLC Agro-Soft)



Р и с. 11. Треки отбора проб почвы
F i g. 11. Soil sampling tracks

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Результаты агрохимического обследования почвы (SGS Лаборатория)
Results of agrochemical soil survey (SGS Laboratory)

Показатель / Indicator	Опыт (треки) / Experience (tracks)			Контроль (треки) / Control (tracks)		
	1	2	3	4	5	6
Влажность завядания, см ³ воды / см ³ почвы / Wilt moisture, cm ³ water / cm ³ soil	0,281	0,336	0,313	0,335	0,287	0,296
Наименьшая влагоемкость, см ³ воды / см ³ почвы / Least moisture capacity, cm ³ of water / cm ³ of soil	0,443	0,487	0,467	0,486	0,448	0,455
Плотность почвы, г/см ³ / Soil density, g/cm ³	1,209	1,184	1,201	1,187	1,207	1,203
Полная влагоемкость, см ³ воды / см ³ почвы / Total moisture capacity, cm ³ of water / cm ³ of soil	0,544	0,553	0,547	0,552	0,544	0,546
Коэффициент фильтруемости, мм/час / Filterability coefficient, mm/hour	2,939	2,792	2,558	2,712	2,853	2,784
Доступная влага см ³ воды / см ³ почвы / Available moisture cm ³ water / cm ³ soil	0,162	0,151	0,154	0,151	0,161	0,159
Глина, % / Clay, %	48,3	56,5	53,1	56,4	49,2	50,6
Ил, % / Silt, %	47,5	40,1	39,8	39,1	46,1	44,6
Песок, % / Sand, %	4,2	3,4	7,1	4,5	4,7	4,8
Обеспеченность почвы элементами питания (низкая) / Soil supply with nutrients (low):						
Орг. в-во, % / Organic matter, %	3,9	–	–	–	–	–
Zn, мг/кг / Zn, mg/kg	5,6	7,6	7,0	9,0	5,6	10,9
S, мг/кг / S, mg/kg	–	15,7	16,9	17,2	–	–
Na, мг/кг / Na, mg/kg	–	44,5	44,3	–	–	–



a) b)

Р и с. 12. Фото рамки до (а) и после (б) среза стеблей

F i g. 12. Photo of the frame before (a) and after (b) cutting the stems

Далее собранный материал нумеровался (рис. 13) и обрабатывался 30.06.2022 г. на опытной станции учебно-опытного хозяйства Кубанского ГАУ «Кубань».

В результате анализа данных после обработки получено увеличение на опытном участке в среднем по сравнению с контрольным (табл. 3):

- количество колосьев 6 %;
- длина колоса 2 %;
- масса зерен 20 колосьев 6 %;
- масса зерна с 1 м² 4 %.

Далее сравнение выполнено по следу (рис. 14а) и вне следа (рис. 14б) по опыту и контролю. Можно заметить, что большая часть показателей по следу выше на 4–24 % в опыте, вне следа, наоборот, на 2–13 % выше по контролю.

Обсуждение и заключение

В результате получены следующие средние данные по урожайности: биологическая (на 29.06.2022 г.) для опыта $Y_o = 7,1$ т/га; для контроля $Y_k = 6,8$ т/га (разница 4,4 %); комбайновая (на 4.07.2022 г.) $Y_o = 6,9$ т/га; $Y_k = 6,3$ т/га (разница 9,5 %).



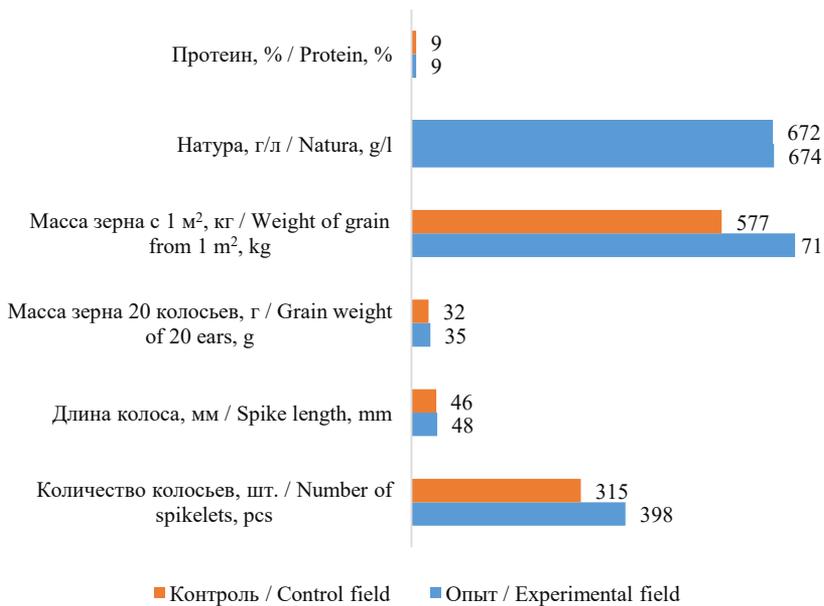
Р и с. 13. Пробы для обработки

F i g. 13. Samples for processing

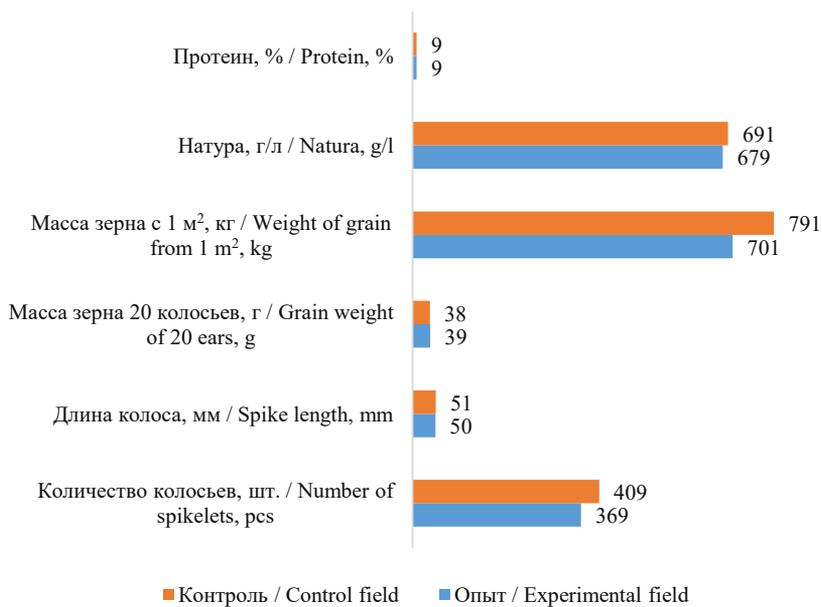
Таблица 3
 Table 3

 Результаты обработки данных после среза растений с 1 м²
 Results of data processing after cutting plants from 1 m²

Статистика / Statistics	Кол-во колосьев, шт. / Number of spikes, pcs.		Длина колоса, мм / Spike length, mm		Масса зерна 20 колосьев, г / Grain weight of 20 spikes, g		Масса зерна с 1 м ² , кг / Weight of grain from 1 m ² , kg		Влажность (Wile 55), % / Moisture (Wile 55), %		Влажность (IM 9500), % / Moisture (IM 9500), %		Натура, г/дл / Nature, г/дл		Протеин, % / Protein, %	
	опыт / experience	контроль / control	опыт / experience	контроль / control	опыт / experience	контроль / control	опыт / experience	контроль / control	опыт / experience	контроль / control	опыт / experience	контроль / control	опыт / experience	контроль / control	опыт / experience	контроль / control
Среднее / Average	384	362	49	48	37	35	0,71	0,68	13,4	12,8	13,8	12,7	676	681	9,1	9,1
Ст. откл. / Statistical deviation	37	56	10	10	3	4	0,64	0,13	0,6	0,6	0,7	0,8	21	26	0,4	0,2
Коэф. вар., % / Variation coefficient, %	10	16	20	20	9	13	9	18	4,8	5,0	5,0	6,5	3	4	4,1	2,7
Ошиб. выб. сред. / Sampling average error	11	16	2	2	1	1	0,19	0,36	0,2	0,2	0,2	0,2	6	8	0,1	0,1
Относит. ош. выб. сред., % / Relative sampling average error, %	3	4	4	5	3	4	3	5	1,4	1,4	1,4	1,9	1	1	1,2	0,8



a)



b)

Р и с. 14. Результаты обработки после среза стеблей: а) по следу; б) вне следа
 F i g. 14. Treatment results after cutting the stems: a) along the trail; b) outside the trail

Исследования длились 10 месяцев. В итоге определено с использованием цифровых технологий, дистанционных и наземных измерений, что давление в шинах оказывает влияние на рост озимого ячменя, развитие болезней, а также урожайность. При этом заметна разница показателей по следу движения шины и вне следа. Таким образом, важным вопросом интенсификации сельскохозяйственного производства, наряду с использованием современных технологий и технических средств, высокопродуктивных

сортов и гибридов, средств защиты растений, является использование шин низкого давления.

Полученные результаты близки к исследованиям британских ученых из университета Харпера Адамса, которые проводили эксперименты в течение 9 лет на шинах низкого давления MICHELIN Ultraflex с различными технологиями обработки почвы.

Показанная в статье методика будет распространена и на другие регионы с различными почвенно-климатическими условиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Effects of Traffic and Tillage on Crop Yield (Winter Wheat Triticum Aestivum) and the Physical Properties of a Sandy Loam Soil [Электронный ресурс] / Е. К. Smith [et al.] // American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2014. doi: <https://doi.org/10.13031/aim.20141912652>
2. Effect of Tracks and Tyres on Soil Physical Properties in a Sandy Loam Soil [Электронный ресурс] / Е. К. Smith [et al.] // American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2014. doi: <https://doi.org/10.13031/AIM.20141912659>
3. Summary of the Effects of Three Tillage and Three Traffic Systems on Cereal Yields Over a Four-Year Rotation / R. J. Godwin [et al.] // Aspects of Applied Biology. 2017. Vol. 134. P. 233–242. doi: <https://doi.org/10.13031/AIM.201701652>
4. An Investigation into the Effect of Traffic and Tillage on Soil Properties and Crop Yields [Электронный ресурс] / Е. К. Smith [et al.] // American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2013. doi: <https://doi.org/10.13031/AIM.20131597846>
5. Исследование базовых характеристик шин сверхнизкого давления / Л. В. Бархатанов [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2012. № 2. С. 172–178. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17956536> (дата обращения: 10.09.2022).
6. Моделирование пневмоколесного движителя сверхнизкого давления. Расчетное исследование базовых характеристик / И. А. Соколов [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. 2021. № 1. С. 26–29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21971966> (дата обращения: 10.09.2022).
7. Кравченко В. А., Яровой В. Г., Меликов И. М. Характер деформирования крупногабаритных шин низкого давления движителей тракторов класса 5 // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 132. С. 1230–1241. doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-132-098>
8. Влияние величины давления воздуха в шинах колес на геометрические параметры пятна контакта при взаимодействии с опорной поверхностью / Ю. А. Ким [и др.] // Труды БГТУ. 2018. № 2. С. 308–312. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35358404> (дата обращения: 10.09.2022).
9. Сыромятников Ю. Н. Пути снижения удельного давления колесных движителей на почву // Сельское хозяйство. 2017. № 4. С. 95–103. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36297585> (дата обращения: 10.09.2022).
10. Автоматическое устройство для регулирования давления воздуха в шинах энергонасыщенных тракторов с заблокированным приводом осей / Ю. Г. Горшков [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2011. Т. 78, № 12. С. 9–12. doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69238>

11. Белокурченко С. А., Гейнрих И. О. Оптимизация конструктивных и эксплуатационных параметров машинно-тракторных агрегатов с учетом уплотняющего воздействия ходовых систем на почву // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2006. № 4. С. 53–58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10366329> (дата обращения: 10.09.2022).

12. Зырянов А. П., Пятаев М. В., Кузнецов Н. А. Снижение воздействия колес трактора на почву // Вестник КрасГАУ. 2014. № 4. С. 223–227. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21621518> (дата обращения: 10.09.2022).

13. Окунев Г. А., Астафьев В. Л., Кузнецов Н. А. Снижение последствия машинных агрегатов на почву // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 12. С. 43–47. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27519037> (дата обращения: 10.09.2022).

14. Экспериментальная оценка тягово-сцепных качеств широкопрофильной шины / С. Д. Зайцев [и др.] / Тракторы и сельхозмашины. 2010. Т. 77, № 8. С. 25–27. URL: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68946/ru_RU (дата обращения: 10.09.2022).

15. Прядкин В. И. Вибронагруженность энергосредства на шинах сверхнизкого давления // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. № 5. С. 29–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21374288> (дата обращения: 10.09.2022).

16. Тягово-сцепные качества высокоэластичных шин сверхнизкого давления / С. Д. Зайцев [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 9. С. 29–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11628396> (дата обращения: 10.09.2022).

Поступила 19.09.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 31.10.2022

Об авторах:

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

Бухарцев Михаил Сергеевич, студент 5 курса Кубанского ГАУ (350044, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), l0ovi@mail.ru

Сотников Денис Андреевич, студент 5 курса Кубанского ГАУ (350044, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), inspaik1337@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

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

М. С. Бухарцев – обзор литературы, участие во всех этапах полевых исследований, обработка полученных экспериментальных данных.

Д. А. Сотников – участие в полевых исследованиях.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Smith E.K., Misiewicz P.A., Girardello V., et al. Effects of Traffic and Tillage on Crop Yield (Winter Wheat Triticum Aestivum) and the Physical Properties of a Sandy Loam Soil. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2014. doi: <https://doi.org/10.13031/aim.20141912652>

2. Smith E.K., Misiewicz P.A., Chaney K., et al. Effect of Tracks and Tyres on Soil Physical Properties in a Sandy Loam Soil. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2014. doi: <https://doi.org/10.13031/AIM.20141912659>
3. Godwin R.J., Misiewicz P.A., Smith E.K., et al. Summary of the Effects of Three Tillage and Three Traffic Systems on Cereal Yields Over a Four-Year Rotation. *Aspects of Applied Biology*. 2017;134:233–242. doi: <https://doi.org/10.13031/AIM.201701652>
4. Smith E.K., Misiewicz P.A., Chaney K., et al. An Investigation into the Effect of Traffic and Tillage on Soil Properties and Crop Yields. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2013. doi: <https://doi.org/10.13031/AIM.20131597846>
5. Barakhtanov L.V., Kotlyarenko V.I., Manyanin S.E., Sokolov I.A. Investigation of Base Characteristics of Tyres of Ultralow Pressure. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseeva*. 2012;(2):172–178. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17956536> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Sokolov I.A., Manyanin S.E., Barakhtanov L.V., et al. Low Pressure Pneumo Wheel Modeling. Rated Research of Basic Characteristics. *Zurnal AAI*. 2021;(1):26–29. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21971966> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kravchenko V.A., Yarovoy V.G., Melikov I.M. The Character of Deflection of the Oversize Tires with Low Pressure in Tractor Propulsion Units of Class 5. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2017;(132):1230–1241. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-132-098>
8. Kim Yu.A., Bobrovich V.A., Voytekhovskiy B.V., Isachenkov V.S. Impact of Air Pressure Size in Tire Wheels on the Geometric Parameters of the Spot of Contact with Interaction with Support Surface. *Trudy BGTU*. 2018;(2):308–312. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35358404> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Syromyatnikov Yu.N. [Ways to Reduce the Specific Pressure of Wheeled Vehicles on the Ground]. *Selskoe khozyaystvo*. 2017;(4):95–103. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36297585> (accessed 10.09.2022). (In Russ.)
10. Gorshkov Y.G., Chetyrkin Y.B., Bogdanov A.V., Leschenko Y.A. An Automatic Device for Air Pressure Regulation in the Tires of High Power Tractors with Locked Axles Drive. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2011;78(12):9–12. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69238>
11. Belokurenko S.A., Heinrich I.O. Optimization of Constructive and Operational Parameters of Machine-Tractor Units with Consideration of Soil Compaction Action of Undercarriage Systems. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2006;(4):53–58. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10366329> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Zyryanov A.P., Pyatayev M.V., Kuznetsov N.A. The Decrease of the Tractor Wheel Influence on the Soil. *Bulletin of KSAU*. 2014;(4):223–227. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21621518> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Okunev G.A., Astafev V.L., Kuznetsov N.A. Reduction of Aftereffect of Machine Units on the Soil. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;(12):43–47. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27519037> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
14. Zaytsev S.D., Streblechenko L.S., Goncharenko S.V., Pryadkin V.I. Experimental Evaluation of Wide-Profile Tire Roadhold. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2010;77(8):25–27. Available at: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68946/ru_RU (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Pryadkin V.I. [Vibration Loading of Power Vehicle on Ultra-Low Pressure Tires]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2012;(5):29–30. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21374288> (accessed 10.09.2022). (In Russ.)

16. Zaytsyev S.D., Goncharyenko S.V., Stryeblyechenko L.S., et al. [Traction Characteristics of Highly Elastic Ultra-Low Pressure Tires]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2008;(9):29–31. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11628396> (accessed 10.09.2022). (In Russ.)

Submitted 19.09.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 31.10.2022

About the authors:

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

Mikhail S. Bukhartsev, 5-Year Student, Kuban SAU (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), l0ovi@mail.ru

Denis A. Sotnikov, 5-Year Student, Kuban SAU (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), inspaik1337@gmail.com

Contribution of the authors:

E. V. Truflyak – scientific guidance for the study, participation in all stages of the experiment, data processing and analysis.

M. S. Bukhartsev – literature review, participation in all stages of field studies, processing of experimental data obtained.

D. A. Sotnikov – participation in field research.

All authors have read and approved the final manuscript.



Исследование поля и энергии в слабопроводящем оптоволокне со степенным профилем показателя преломления произвольной степени

В. А. Гладких, В. Д. Власенко

*Вычислительный центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук (г. Хабаровск, Российская Федерация)*

vlasenko@as.khb.ru

Аннотация

Введение. Рассмотрен слабопроводящий градиентный световод в одномодовом режиме, решено уравнение для электрического поля в сердцевине такого световода в общем виде в первом приближении. Целью работы является исследование поля и энергии в сердцевине слабопроводящего градиентного световода без учета поляризации в одномодовом режиме в случае степенного (в общем виде) профиля показателя преломления.

Материалы и методы. Из уравнений Максвелла для диэлектрических сред выведено уравнение для поля в световоде с градиентным профилем показателя преломления. Производя соответствующие подстановки, заменяя функцию Бесселя нулевого порядка на гауссову функцию и делая необходимое приближение полученного уравнения, приходим к уравнению, которое решаем методом Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна, и получаем аналитические выражения для поля и энергии внутри волновода для произвольной степени показателя преломления.

Результаты исследования. Получено решение уравнения для поля в световоде со степенным профилем показателя преломления. Проведены численные расчеты. Построен график зависимости безразмерной величины – «нормированной» энергии – от волноводного параметра для первых пяти степеней профиля ($n = 1, 2, 3, 4, 5$).

Обсуждение и заключение. Показано, что быстрее растет энергия для профиля с $n = 1$, а после этого значения с резким отрывом растет энергия для профиля с $n = 1$, а для $n > 1$ рост энергии уменьшается с увеличением n . Полученные в работе результаты могут быть применены при создании энергетически выгодной сердцевины и для возможного анализа передачи информации, а также для конструирования волноводов с учетом конкретных приложений.

Ключевые слова: слабопроводящий градиентный световод, одномодовый режим, степенной профиль показателя преломления, уравнения Максвелла, метод ВКБ, нормированная энергия

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гладких В. А., Власенко В. Д. Исследование поля и энергии в слабопроводящем оптоволокне со степенным профилем показателя преломления произвольной степени // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 588–599. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.588-599>

© Гладких В. А., Власенко В. Д., 2022



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

Investigation of Field and Energy in a Weakly-Conducting Optical Fiber with an Arbitrary Degree of Refractive Index Profile

V. A. Gladkikh, V. D. Vlasenko 

Computer Center of the Far Eastern Branch

of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russian Federation)

 vlasenko@as.khb.ru

Abstract

Introduction. We consider a weakly conductive gradient fiber in the single-mode regime and solve the equation for the electric field in the core of this fiber in a general form in the first approximation. The aim of this study is to study the field and energy in the core of a weakly conductive gradient fiber without taking into account the polarization in the single-mode regime in the case of a power-law (generally) refractive index profile.

Materials and Methods. From Maxwell's equations for dielectric media, there was derived an equation for the field in a fiber with gradient refractive index profile. Making the appropriate substitutions, replacing the zero-order Bessel function with a Gaussian function, and making the necessary approximation of the resulting equation, we arrive at an equation that we solve by the Wentzel – Kramers – Brillouin method and obtain analytical expressions for the field and energy inside waveguide for an arbitrary degree of the refractive index.

Results. There was obtained a solution of the equation for the field in fiber with a power-law refractive index profile. Numerical calculations were carried out. A graph of the dependence of a dimensionless quantity – “normalized” energy – on the waveguide parameter for the first five powers of the profile ($n = 1, 2, 3, 4, 5$) was plotted.

Discussion and Conclusion. It is shown that the energy increases faster for the profile with $n = 1$, and after this value, the energy for the profile with $n = 1$ increases sharply, and for $n > 1$, the energy growth decreases with increasing n . The results obtained in this work can be used for creating an energy-efficient core, for carrying out a possible analysis of information transmission, and for designing waveguides taking into account specific applications.

Keywords: weakly conductive gradient fiber, single-mode regime, power-law refractive index profile, Maxwell equations, WKB method, normalized energy

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

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

For citation: Gladkikh V.A., Vlasenko V.D. Investigation of Field and Energy in a Weakly-Conducting Optical Fiber with an Arbitrary Degree of Refractive Index Profile. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):588–599. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.588-599>

Введение

В качестве оптических волокон применяются диэлектрики со ступенчатым или градиентным профилем показателя преломления. Ведутся интенсивные экспериментальные исследования по поиску оптимальных материалов волокон для тех или иных целей. Аналитически

исследованы волноводы для волокон со ступенчатым профилем показателя преломления. С градиентным профилем показателя преломления аналитика осложняется в связи с трудностями при решении достаточно сложных уравнений, возникающих из-за пространственной зависимости профиля

показателя преломления. Эксперименты показали, что хорошей моделью для математического исследования физических процессов с градиентным профилем может служить модель степенного профиля показателя преломления. Самое известное точное решение связано с неограниченным параболическим профилем показателя преломления. В связи со сложностями при получении точного решения для других случаев градиентных профилей разрабатываются разнообразные приближенные методы решения таких уравнений.

Целью настоящей работы является приближенное решение для поля в сердцевине слабопроводящего градиентного световода (в одномодовом режиме) в случае степенного (в общем виде) профиля показателя преломления и исследование зависимости энергии поля в сердцевине волновода от волнового параметра.

Обзор литературы

В науке и технике давно используются оптические волокна (световоды), по которым могут распространяться оптические лучи. Достаточно полные и общие сведения о световодах и диэлектрических волноводах содержатся в фундаментальной монографии А. Снайдера и Дж. Лава, где широко представлена информация о различных видах волноводов с кратким описанием экспериментальных и теоретических результатов с большим количеством примеров и различных математических методов¹. Однако со времени издания этого труда прошло немало времени, и исследования по этой тематике значительно продвинулись. Кратко отметим их направления.

Предложено устойчивое к изгибам одномодовое волокно с большой площадью моды и низкими потерями на изгибе [1]; дан анализ многожильного

маломодового волокна с составным профилем показателя преломления и двойной вспомогательной структурой [2]; смоделирована и вычислена уникальная трехмерная прерывистая конечно-элементная модель Петрова – Галеркина для моделирования лазерного усиления в волоконном усилителе [3]; предложены оптоволоконные датчики, основанные на френелевском отражении на конце волокна [4]. Усовершенствован и модифицирован метод расширенной тангенс-функции (применяется для получения оптических солитонов для двухъядерных ответвителей кубической четверти (CQ) в оптических метаматериалах, имеющих секстический степенной закон Кудряшова с произвольным показателем преломления) [5]; рассмотрены ребристые волноводы, в которых направляющий слой в основном состоит из пластины с наложенной на нее одной или несколькими полосами [6]; исследованы сегментированные волноводы (такие волноводы могут периодически изменять свое поперечное сечение, обеспечивая передачу света без потерь через так называемые блоховские моды) [7].

Заслуживает внимание работа, где впервые были предложены перспективные микроструктурированные или дырчатые волоконные световоды из кварцевого стекла. В оболочке таких световодов делаются продольные отверстия, расположенные в поперечном сечении относительно друг друга в том или ином порядке [8]. Большой контраст показателя преломления сердцевины и оболочки определяет уникальные оптические свойства таких волноводов. В частности, варьируя геометрию оболочки, можно управлять дисперсионными свойствами световода. Математический аппарат для анализа таких световодов можно найти в других

¹ Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.

статьях [9–11]. Возможность управления показателем преломления оболочки в таких волноводах позволяет создавать одномодовое оптоволокно. В нем на любой длине волны распространяется только одна мода (еще одна особенность таких волноводов – существование одномодового режима в волокнах с большим диаметром сердцевины). Различные аспекты этого направления хорошо представлены [12–15].

Что касается классических градиентных световодов, то на сегодняшний день получено точное решение для поля в волокне только в случае неограниченного параболического профиля: обобщенные полиномы Лагерра в цилиндрических координатах или функции Гаусса – Эрмита в декартовых. Подробный анализ этого решения можно найти в классической литературе². Для произвольного градиентного планарного волновода получены модовые решения уравнения Гельмгольца – амплитуда моды представлена в виде экспоненты с показателем в виде ряда Тейлора, коэффициенты которого находятся из рекуррентных соотношений [16]. С помощью моделирования показано, что градиентные микролинзы Микаэляна и «рыбий глаз» Максвелла могут формировать изображения со сверхразрешением.

Представлен новый подход к разработке структурированных оптических волокон. Показано, что при внутреннем наноструктурировании сердцевины, состоящей из двух стекол, могут быть созданы волокна с эффективным профилем градиента показателя преломления с заданным распределением показателя преломления [17].

В случае трехмерного градиентного световода с круглым поперечным сечением ранее нами получено в первом

приближении аналитическое выражение для поля и энергии в одномодовом режиме внутри слабопроводящего волокна со степенным профилем показателя преломления с произвольной степенью (с учетом поляризации) путем решения уравнения Гельмгольца методом функции Грина. Построены зависимости энергии от волноводного параметра для второй и третьей степени профиля показателя преломления выражения. Показано, что в рассматриваемом приближении энергия увеличивается с ростом волноводного параметра до определенного значения параметра, после которого зависимости энергии от волноводного параметра меняются местами для второй и третьей степени [18].

В настоящей работе другими методами, отличными от примененных в статье [18], мы определим поле и энергию в одномодовом режиме внутри слабопроводящего волокна со степенным профилем показателя преломления с произвольной степенью без учета поляризации (что упрощает вычисления), построим соответствующие зависимости энергии и результаты сопоставим с результатами предыдущей работы [18]. Тем самым мы полностью решим задачу без учета поляризации и с учетом поляризации. Результаты данной и предыдущей [18] работ могут быть использованы для конструирования световодов в зависимости от конкретных приложений (в частности, построенные зависимости энергии от волноводного числа могут помочь подобрать материал сердцевины световода с подходящей степенной зависимостью профиля показателя преломления).

Материалы и методы

Выведем уравнение для поля в световоде с градиентным профилем показателя преломления. Пусть

² Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. Пер. с англ. М. : Мир, 1984. 512 с. ; Семенов Н. А. Оптические кабели связи: теория и расчет. М. : Радио и связь, 1981. 152 с.

$\{\vec{e}(t, R), \vec{h}(t, R)\}$ – соответственно электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля (t – время, $R = (x, y, z)$ – координаты). Из уравнений Максвелла для диэлектрических сред с показателем преломления $n^2(R)$, отделяя временную часть, в результате преобразований для электрической компоненты электромагнитного поля (для магнитной компоненты аналогично) получим:

$$\vec{e}(t, R) = \vec{E}(R) \exp(-i\omega t) \rightarrow \Delta \vec{E} + k^2 n^2 \vec{E} = -\nabla(\vec{E}, \nabla[\ln(n^2)]), \quad (1)$$

где c – скорость света, ω – циклическая частота, $k = \omega / c$. Для волокна (сердцевины) градиентного световода $n^2 = n^2(r)$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, поле в волокне также зависит от r и распространяется вдоль оси z . Для поля \vec{E} запишем ($\vec{n}_z, \beta, \varphi$ – соответственно единичный вектор направления распространения поля вдоль оси z , постоянная распространения и угол в плоскости (x, y))

$$\vec{E}(R) = \vec{n}_z \exp(i\beta z) \exp(im\varphi) E(r). \quad (2)$$

Случай с ненулевой правой частью в (2) в первом приближении рассмотрен нами в другой работе [18]. Отбрасывая в (1) правую часть (не рассматривая поляризационные свойства, описываемые членами, содержащими $\nabla\{\ln n^2\}$), от (1), (2) перейдем к скалярному уравнению в полярных координатах для основной моды ($m = 0$):

$$\frac{d^2 E(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE(r)}{dr} + \{k^2 n^2(r) - \beta^2\} E(r) = 0. \quad (3)$$

Показатель преломления для волновода обычно записывается в следующем виде:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_{co}^2 [1 - 2\Delta h(r)], & 0 \leq r \leq \rho, \\ n_{cl}^2, & r > \rho, \end{cases} \\ 2\Delta = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{n_{co}^2}, \quad h(0) \equiv 0, \quad h(\rho) \equiv 1, \quad (4)$$

где $h(r)$ – возрастающая от 0 до 1 функция при изменении r от 0 до ρ ; n_{co}^2, n_{cl}^2 – показатели преломления волокна и оболочки; Δ – высота профиля; ρ – радиус круглого в поперечнике волокна.

Подставляя (4) в (3), запишем результат в виде (перейдем к безразмерной переменной γ)

$$\frac{d^2 E(\gamma)}{d\gamma^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{dE(\gamma)}{d\gamma} + (\chi_1 \rho)^2 E(\gamma) = V^2 h(\gamma) E(\gamma); \\ \gamma \equiv r/\rho, \quad \chi_1^2 \equiv k^2 n_{co}^2 - \beta^2, \\ V \equiv k\rho NA, \quad NA \equiv \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \quad (5)$$

здесь V, NA – волноводный параметр и числовая апертура.

При этом (4) принимает вид

$$n^2(\gamma) = \begin{cases} n_{co}^2 [1 - 2\Delta h(\gamma)], & 0 \leq \gamma \leq 1, \\ n_{cl}^2, & \gamma > 1, \end{cases} \\ 2\Delta = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{n_{co}^2}, \quad h(0) \equiv 0, \quad h(1) \equiv 1. \quad (6)$$

Результаты исследования

Найдем решение уравнения для поля в световоде с градиентным профилем показателя преломления.

Поскольку

$$\frac{d^2 E_0(\gamma)}{d\gamma^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{dE_0(\gamma)}{d\gamma} + (\chi_1 \rho)^2 E_0(\gamma) = 0 \rightarrow \\ \rightarrow E_0(\gamma) = J_0(\chi_1 \rho \gamma), \quad (7)$$

то решение уравнения (5) будем искать в виде

$$E(\gamma) \equiv f(\gamma)E_0(\gamma). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (5), с учетом (7) для неизвестной функции $f(\gamma)$ получим уравнение

$$f''(\gamma) + \left(\frac{1}{\gamma} + 2 \frac{E_0'(\gamma)}{E_0(\gamma)} \right) f'(\gamma) - V^2 h(\gamma) f(\gamma) = 0, \quad \left(f'(\gamma) \equiv \frac{df(\gamma)}{d\gamma} \right). \quad (9)$$

Заменяем здесь функцию Бесселя $E_0(\gamma) = J_0(\chi, \rho\gamma)$, описывающую одно-модовый режим волновода со ступенчатым профилем, на гауссову функцию (r_0 – радиус модового пятна):

$$E_0(\gamma) = J_0(\chi, \rho\gamma) \rightarrow E_0(\gamma) = \exp\{-\alpha\gamma^2/2\}, \\ \alpha \equiv \rho^2/r_0^2, \quad (10)$$

причем (см. [18–22]):

$$r_0 \cong \frac{0,4\lambda}{NA} \rightarrow \alpha \equiv \frac{\rho^2}{r_0^2} \cong 0,16V^2; \\ V \in (0; 2,405) \\ \left(NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \right. \\ \left. V = k\rho NA, k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \right), \quad (11)$$

обоснование применения этой формулы для нашего случая, полученной для волновода со ступенчатым профилем показателя преломления, показано в другой работе [21]. Подставляя (10) в (9), запишем уравнение в виде

$$f''(\gamma) + \left(\frac{1}{\gamma} - 2\alpha\gamma \right) f'(\gamma) - V^2 h(\gamma) f(\gamma) = 0. \quad (12)$$

Рассмотрим коэффициент при первой производной и выясним, при каких значениях γ он обращается в нуль (воспользуемся (11)):

$$\frac{1}{\gamma} - 2\alpha\gamma = 0 \rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{2\alpha}} = \\ = \frac{1}{V\sqrt{0,32}} \in \{V \in (0; 2,4)\} \in (0,74; 3,54),$$

откуда

$$\frac{1}{\gamma} > 2\alpha\gamma \rightarrow \gamma < 0,74, \quad \frac{1}{\gamma} < 2\alpha\gamma \rightarrow \gamma > 3,54. \quad (13)$$

Выбирая первый вариант для поля внутри сердцевины волновода, перепишем (12) в упрощенном виде

$$f''(\gamma) + \frac{1}{\gamma} f'(\gamma) - V^2 h(\gamma) f(\gamma) = 0, \\ (\gamma < 0,74). \quad (14)$$

Решать уравнение будем аналогично методу ВКБ (Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна)³ (современное изложение в [23]).

Итак, искомую функцию запишем в виде

$$f(\gamma) \equiv \exp\{p(\gamma)\} \rightarrow \\ \rightarrow f'(\gamma) = p'(\gamma) f(\gamma), \quad (15)$$

$$f''(\gamma) = p''(\gamma) f(\gamma) + (p'(\gamma))^2 f(\gamma).$$

Подставляя в (14), получаем уравнение для функции $p(\gamma)$

$$p''(\gamma) + \{p'(\gamma)\}^2 + \\ + \frac{1}{\gamma} p'(\gamma) - V^2 h(\gamma) = 0. \quad (16)$$

³ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Квантовая механика (Нерелятивистская теория). 4-е изд., испр. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 768 с.

Предположим малость второй производной $p''(\gamma)$:

$$|p''(\gamma)| \ll |-V^2 h(\gamma)| = V^2 h(\gamma). \quad (17)$$

Тогда для (16) мы можем записать

$$\begin{aligned} p'(\gamma) &\equiv y(\gamma) \rightarrow y^2(\gamma) + \frac{1}{\gamma} y(\gamma) - V^2 h(\gamma) \rightarrow \\ &\rightarrow \{p'(\gamma)\}_{1,2} = \{y(\gamma)\}_{1,2} = \\ &= -\frac{1}{2\gamma} \pm \frac{1}{2\gamma} \sqrt{1 + 4V^2 h(\gamma)\gamma^2} \rightarrow \{p(\gamma)\}_{1,2} = \\ &= \ln\left(\frac{1}{\sqrt{\gamma}}\right) \pm \frac{1}{2} \int \frac{\sqrt{1 + 4V^2 h(\gamma)\gamma^2}}{\gamma} d\gamma, \quad (18) \end{aligned}$$

и согласно (8), (10) и (15) получим для поля

$$\begin{aligned} E(\gamma) &= \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \exp\left\{\pm \frac{1}{2} \int \frac{\sqrt{1 + 4V^2 h(\gamma)\gamma^2}}{\gamma} d\gamma\right\} \times \\ &\times \exp\{-\alpha\gamma^2/2\}. \quad (19) \end{aligned}$$

Поскольку в случае ступенчатого волновода $h(\gamma) = 0$ ($\gamma \in (0, 1)$), то выбираем знак плюс – в этом случае (19) сводится к выражению (10).

Окончательно получаем

$$\begin{aligned} E(\gamma) &= \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \exp\left\{\frac{1}{2} \int \frac{\sqrt{1 + 4V^2 h(\gamma)\gamma^2}}{\gamma} d\gamma\right\} \times \\ &\times \exp\{-\alpha\gamma^2/2\}. \quad (20) \end{aligned}$$

Подчеркнем, что при $\gamma \rightarrow 0$ поле не обращается в нуль, согласно предыдущему выражению.

Дифференцируя $p'(\gamma)$ из (18), условие (17) запишем в виде

$$\left|1 + \frac{2[2V^2 h'(\gamma)\gamma^3 - 1]}{\sqrt{1 + 4V^2 h(\gamma)\gamma^2}}\right| \ll 2V^2 h(\gamma)\gamma^2. \quad (21)$$

Формулы (20), (21) получены для произвольной функции $h(\gamma)$, удовлетворяющей требованиям из (6).

Полагая выполненным неравенство (21), для поля в случае степенного профиля показателя преломления запишем функцию $h(\gamma)$ вместе с выражением для поля (20):

$$\begin{aligned} h(\gamma) &= \gamma^n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \rightarrow \\ \rightarrow E(\gamma) &= \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \exp\left\{\frac{1}{2} \int \frac{\sqrt{1 + 4V^2 \gamma^{n+2}}}{\gamma} d\gamma\right\} \times \\ &\times \exp\{-\alpha\gamma^2/2\}. \end{aligned}$$

С помощью вспомогательного интеграла

$$\begin{aligned} \int \frac{\sqrt{1 + ax^m}}{x} dx &= \\ &= \frac{2}{m} \sqrt{1 + ax^m} + \ln\left\{\frac{\sqrt{1 + ax^m} - 1}{\sqrt{1 + ax^m} + 1}\right\}^{1/m}, \quad (22) \end{aligned}$$

предыдущее выражение для поля, в случае степенного профиля показателя преломления, принимает окончательный вид (в (22) $a = 4V^2$, $m = n + 2$):

$$\begin{aligned} h(\gamma) &= \gamma^n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \rightarrow \\ \rightarrow E_n(\gamma) &= \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \left\{\frac{\sqrt{1 + 4V^2 \gamma^{n+2}} - 1}{\sqrt{1 + 4V^2 \gamma^{n+2}} + 1}\right\}^{1/4n} \times \\ &\times \exp\left\{\frac{1}{n+2} \sqrt{1 + 4V^2 \gamma^{n+2}}\right\} \times \\ &\times \exp\{-\pm\gamma^2/2\}. \quad (23) \end{aligned}$$

Наконец, для безразмерной нормированной энергии $W_{norm(n)}(V)$ (отношение энергии поля (23) $W_{gr(n)}(V) \equiv \int_0^1 E_n^2(\gamma)\gamma d\gamma$ к энергии поля (10)

для ступенчатого профиля $W_{st}(V) \equiv \int_0^1 E_0^2(\gamma) \gamma d\gamma = \int_0^1 \exp(-\alpha\gamma^2) \gamma d\gamma$ в одномодовом режиме) находим (несмотря на выбранный вариант в (13), не снижая общности, интегрируем по γ от нуля до единицы) ($V \in (0,5; 2,4)$, $n = 1, 2, 3, 4, 5$)

$$W_{norm(n)}(V) \equiv \frac{W_{gr(n)}(V)}{W_{st}(V)} = \left[\int_0^1 \exp(-\alpha\gamma^2) \gamma d\gamma = \frac{1}{2\alpha} [1 - \exp(-\alpha)] \right] = \frac{0,32V^2}{1 - \exp(-0,16V^2)} \left\{ \int_0^1 \left(\frac{\sqrt{1+4V^2x^{n+2}} - 1}{\sqrt{1+4V^2x^{n+2}} + 1} \right)^{1/2n} \times \exp\left(\frac{2}{n+2}\sqrt{1+4V^2x^{n+2}}\right) \cdot \exp(-0,16V^2x^2) dx \right\}.$$

На рисунке для слабопроводящего оптоволокна с градиентным профилем показателя преломления, без учета поляризации в одномодовом режиме в случае степенного профиля показателя преломления при $n = 1, 2, 3, 4, 5$, построены зависимости «нормированной» энергии $W_{norm(n)}$ от волноводного параметра. Показано, что до значения $V_c \sim 0,9$ быстрее растет энергия для профиля с $n = 1$ (но в точке $V_c \sim 0,9$ для всех рассмотренных степеней энергия совпадает), а после этого значения с резким отрывом растет энергия для профиля с $n = 1$, а для $n > 1$ рост энергии уменьшается с увеличением n .

Если сравнить результаты с данными нашей предыдущей работы [18], посвященной анализу поля и энергии слабопроводящего оптоволокна, с учетом поляризации в одномодовом режиме в случае степенного профиля показателя преломления, рассмотренного для случаев $n = 2, 3$, то учет поляризации

сводится к смещению точки V_c от значения 0,9 до значения 1,55.

Обсуждение и заключение

Как видно из рисунка, при изменении параметра V от значения 0,5 до 2,405, согласно формуле (11), нормированная энергия W_{norm} растет от 1 до $W_{norm(max)} \approx 7,5$ для профиля с $n=1$, до $W_{norm(min)} \approx 2$ для профиля с $n = 5$. Для всех рассмотренных профилей значения соответствующих энергий превышают энергии ступенчатого профиля для соответствующих значений параметра V . Исключая мало применяемый профиль с $n=1$, видим, что наиболее энергоэффективным из всех степенных профилей оказывается профиль с $n = 1$, что подтверждается экспериментальными данными⁴.

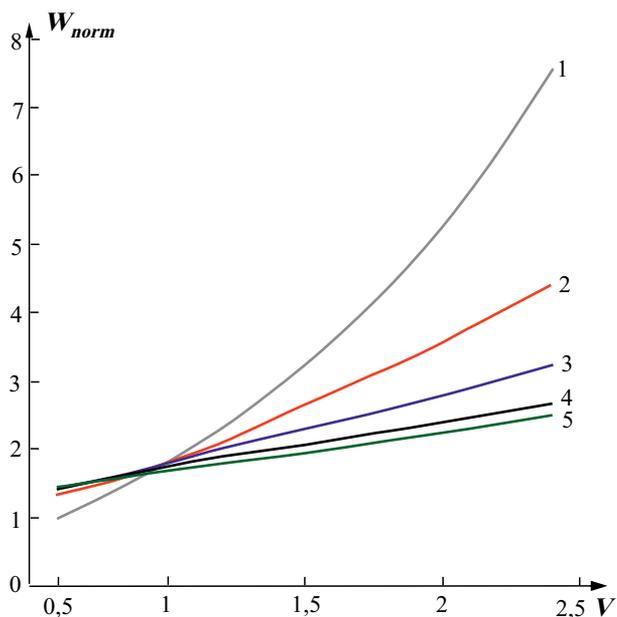
Поскольку согласно формуле (5)

$$V = k\rho NA = \left\{ k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}, NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \right\} = 2\pi \frac{\rho}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2},$$

и энергоэффективность возрастает с ростом параметра V , то при постоянной численной апертуре NA в рассматриваемом слаборазрешающем случае ($NA \ll 1$ – малая разность между показателем преломления в сердцевине волокна и показателем преломления оболочки) параметр V можно повышать либо уменьшением длины волны, либо увеличением радиуса сердцевины.

Данная работа посвящена исследованию зависимости поля и энергии в градиентных волокнах со степенным профилем показателя преломления. Результаты получены в общем виде для произвольной степени показателя преломления и проиллюстрированы для выбранных степеней (в предыдущей

⁴ Семенов Н. А. Оптические кабели связи: теория и расчет.



Р и с. Зависимость нормированной энергии W_{norm} от волноводного параметра V для профиля показателя преломления n : 1 – профиль $n = 1$; 2 – профиль $n = 2$; 3 – профиль $n = 3$; 4 – профиль $n = 4$; 5 – профиль $n = 5$

Fig. Dependence of the normalized energy W_{norm} on the waveguide parameter V for the refractive index profile n : 1 – profile $n = 1$; 2 – profile $n = 2$; 3 – profile $n = 3$; 4 – profile $n = 4$; 5 – profile $n = 5$

работе [18] для случаев $n = 2, 3$, а в настоящей для $n = 1, 2, 3, 4, 5$). При этом аналитические расчеты были проведены разными методами. Показано, что учет поляризации сводится к смещению точки пересечения V_c от значения

0,9 до значения 1,55. Полученные результаты, с учетом конкретных приложений, могут быть применены при конструировании энергетически выгодного профиля сердцевины волокна и для анализа передачи информации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tong Y., Chen S., Tian H. A Bend-Resistant Low Bending Loss and Large Mode Area Two-Layer Core Single-Mode Fiber with Gradient Refractive Index Ring and Multi-Trench // Optical Fiber Technology. 2018. Vol. 45. P. 235–243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.07.010>
2. A Low Crosstalk Multi-Core Few-Mode Fiber with Composite Refractive Index Profile and Air-Hole Embedded Trench Assistance [Электронный ресурс] / G. Wang [et al.] // Optics Communications. 2019. Vol. 499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127258>
3. Hennekinga S., Grosekb J., Demkowicza L. Model and Computational Advancements to Full Vectorial Maxwell Model for Studying Fiber Amplifiers // Computers & Mathematics with Applications. 2021. Vol. 85, Issue 1. P. 30–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2021.01.006>
4. Numerical and Experimental Study of a Multimode Optical Fiber Sensor Based on Fresnel Reflection at the Fiber Tip for Refractive Index Measurement [Электронный ресурс] / A. Brientin [et al.] // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107315>
5. Cubic–Quartic Solitons in Twin-Core Couplers with Optical Metamaterials Having Kudryashov’s Sextic Power Law of Arbitrary Refractive Index by Using Improved Modified Extended Tanh-Function

Method [Электронный ресурс] / Н. А. Eldidamony [et al.] // Optik. 2022. Vol. 265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169498>

6. Single-Mode Porous Silicon Waveguide Interferometers with Unity Confinement Factors for Ultra-Sensitive Surface Adlayer Sensing / T. H. Talukdar [et al.] // Optics Express. 2019. Vol. 23, Issue 16. P. 22485–22498. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.27.022485>

7. Segmented Waveguides in Thin Silicon-On-Insulator / M. Hochberg [et al.] // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. 2005. Vol. 22, Issue 7. P. 1493–1497. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.22.001493>

8. All-Silica Single-Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding / J. C. Knight [et al.] // Optics Letters. 1997. Vol. 21, Issue 19. P. 1547–1549. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.21.001547>

9. Multipole Method for Microstructured Optical Fibers. I. Formulation / T. P. White [et al.] // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. 2002. Vol. 19, Issue 10. P. 2322–2330. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.19.002322>

10. Multipole Method for Microstructured Optical Fibers. II. Implementation and Results / B. T. Kuhlmey [et al.] // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. 2002. Vol. 19, Issue 10. P. 2331–2340. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.19.002331>

11. Гапонов Д. А., Бирюков А. С. Эффективный метод анализа оптических свойств микро-структурированных волоконных световодов // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 77–104. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20211611> (дата обращения: 20.06.2022).

12. Ultimate Low Loss of Hollow-Core Photonic Crystal Fibers / P. J. Roberts [et al.] // Optics Express. 2005. Vol. 13, Issue 1. P. 236–244. doi: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000236>

13. Dudley J. M., Genty G., Coen S. Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber [Электронный ресурс] // Reviews of Modern Physics. 2006. Vol. 78, Issue 4. doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1135>

14. Russell P. St. J. Photonic-Crystal Fibers // Journal of Lightwave Technology. 2006. Vol. 24, Issue 12. P. 4729–4749. URL: <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?uri=JLT-24-12-4729> (дата обращения: 20.06.2022).

15. Sharma D. K., Tripathi S. M., Sharma A. Modal Analysis of High-Index Core Tellurite Glass Microstructured Optical Fibers in Infrared Regime // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. Vol. 511. P. 147–160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.001>

16. Котляр В. В., Ковалев А. А., Налимов А. Г. Градиентные элементы микрооптики для достижения сверхразрешения // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 4. С. 369–378. URL: <https://clck.ru/32cDqP> (дата обращения: 20.06.2022).

17. Optical Fibers with Gradient Index Nanostructured Core / R. Buczyński [et al.] // Optics Express. 2015. Vol. 23. P. 25588–25596. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.23.025588>

18. Gladkikh V. A., Vlasenko V. D. Investigation of the Dependence of the Field Energy in a Low Conductive Fiber Optic with a Gradient Profile of the Refractive Index [Электронный ресурс] // Optik. 2021. Vol. 245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167735>

19. Листвин В. Н., Трешиков В. Н. DWDM-системы // Фотон-экспресс. 2012. № 7. С. 34–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20211587> (дата обращения: 20.06.2022).

20. Gladkikh V. A. Расчет мощности поля, проникающего во внешнюю оболочку слабонаправляющего одномодового волоконного световода // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 4. С. 557–561. doi: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-557-561>

21. Gladkikh V. A., Vlasenko V. D. Энергетические потери при сращивании двух оптических волокон, одно из которых эллиптически деформировано в месте соединения // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 11. С. 1074–1078. doi: <https://doi.org/10.31857/S0033849420110066>

22. Gladkikh V. A., Vlasenko V. D. Расчет потерь при сращивании двух волокон, одно из которых эллиптически деформировано в поперечнике по всей длине // Оптический журнал. 2021. Т. 88, № 2. С. 73–78. doi: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-02-73-78>

23. Hall B. C. Quantum Theory for Mathematicians (Graduate Texts in Mathematics, 267). New York : Springer, 2013. 566 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7116-5>

Поступила 27.06.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 19.10.2022
Technologies, machinery and equipment 597

Об авторах:

Гладких Вячеслав Александрович, старший научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (680000, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65), кандидат физико-математических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3922-9609>, Researcher ID: [GLU-2712-2022](https://orcid.org/0000-0002-3922-9609), gladkih@as.khb.ru

Власенко Виктор Дмитриевич, ученый секретарь Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (680000, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65), кандидат физико-математических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-4532>, Researcher ID: [E-2432-2019](https://orcid.org/0000-0001-7782-4532), vlasenko@as.khb.ru

Заявленный вклад авторов:

В. А. Гладких – разработка концепции и плана статьи, проведение теоретических исследований, обзор и анализ литературы, формулировка выводов.

В. Д. Власенко – расчеты, анализ результатов, подготовка текста с последующей доработкой.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Tong Y., Chen S., Tian H. A Bend-Resistant Low Bending Loss and Large Mode Area Two-Layer Core Single-Mode Fiber with Gradient Refractive Index Ring and Multi-Trench. *Optical Fiber Technology*. 2018;45:235–243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.07.010>
2. Wang G., Zhang J., Zhang H., et al. A Low Crosstalk Multi-Core Few-Mode Fiber with Composite Refractive Index Profile and Air-Hole Embedded Trench Assistance. *Optics Communications*. 2019;499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127258>
3. Hennekinga S., Grosekb J., Demkowicz L. Model and Computational Advancements to Full Vectorial Maxwell Model for Studying Fiber Amplifiers. *Computers & Mathematics with Applications*. 2021;85(1):30–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2021.01.006>
4. Brientin A., Leduc D., Gaillard V., et al. Numerical and Experimental Study of a Multimode Optical Fiber Sensor Based on Fresnel Reflection at the Fiber Tip for Refractive Index Measurement. *Optics & Laser Technology*. 2021;143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107315>
5. Eldidamony H.A., Ahmed H.M., Zaghrou A.S., et al. Cubic–Quartic Solitons in Twin-Core Couplers with Optical Metamaterials Having Kudryashov’s Sextic Power Law of Arbitrary Refractive Index by Using Improved Modified Extended Tanh-Function Method. *Optik*. 2022;265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169498>
6. Talukdar T.H., Allen G.D., Kravchenko I., Ryckman J.D. Single-Mode Porous Silicon Waveguide Interferometers with Unity Confinement Factors for Ultra-Sensitive Surface Adlayer Sensing. *Optics Express*. 2019;23(16):22485–22498. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.27.022485>
7. Hochberg M., Baehr-Jones T., Walker C., et al. Segmented Waveguides in Thin Silicon-On-Insulator. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. 2005;22(7):1493–1497. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.22.001493>
8. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. All-Silica Single-Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding. *Optics Letters*. 1997;21(19):1547–1549. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.21.001547>
9. White T.P., Kuhlmeiy B.T., McPhedran R.C., et al. Multipole Method for Microstructured Optical Fibers. I. Formulation. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. 2002;19(10):2322–2330. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.19.002322>
10. Kuhlmeiy B.T., White T.P., Renversez G., et al. Multipole Method for Microstructured Optical Fibers. II. Implementation and Results. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. 2002;19(10):2331–2340. doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.19.002331>

11. Gaponov D.A., Biriukov A.S. The Effective Method for Analysis of Optical Properties of Micro-structured Optical Fibers. *Foton-Ekspress*. 2005;(6):77–104. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20211611> (accessed 20.06.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Roberts P.J., Couny F., Sabert H., et al. Ultimate Low Loss of Hollow-Core Photonic Crystal Fibers. *Optics Express*. 2005;13(1):236–244. doi: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000236>
13. Dudley J.M., Genty G., Coen S. Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber. *Reviews of Modern Physics*. 2006;78(4). doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1135>
14. Russell P.St.J. Photonic-Crystal Fibers. *Journal of Lightwave Technology*. 2006;24(12):4729–4749. Available at: <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?uri=JLT-24-12-4729> (accessed 20.06.2022).
15. Sharma D.K., Tripathi S.M., Sharma A. Modal Analysis of High-Index Core Tellurite Glass Microstructured Optical Fibers in Infrared Regime. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019;511:147–160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.001>
16. Kotlyar V.V., Kovalev A.A., Nalimov A.G. [Gradient Micro-Optics Elements to Achieve Super-Resolution]. *Computer Optics*. 2009;33(4):369–378. Available at: <https://clck.ru/32cDqP> (accessed 20.06.2022). (In Russ.)
17. Buczyński R., Klimczak M., Stefaniuk T., et al. Optical Fibers with Gradient Index Nanostructured Core. *Optics Express*. 2015;23:25588–25596. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.23.025588>
18. Gladkikh V.A., Vlasenko V.D. Investigation of the Dependence of the Field Energy in a Low Conductive Fiber Optic with a Gradient Profile of the Refractive Index. *Optik*. 2021;245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167735>
19. Listvin V.N., Treshchikov V.N. [DWDM Systems]. *Foton-Ekspress*. 2012;(7):34–37. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20211587> (accessed 20.06.2022). (In Russ.)
20. Gladkikh V.A. Calculation of the Power of the Field, Penetrating into the External Environment of the Weakening Guide of a Single-Mode Fiber. *Computer Optics*. 2019;43(4):557–561. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-557-561>
21. Gladkikh V.A., Vlasenko V.D. Energy Loss during Splitting of Two Optical Fibers, One of Which Is Elliptically Deformed at the Joint. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020;65(11):1074–1078. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S0033849420110066>
22. Gladkikh V.A., Vlasenko V.D. Calculation of the Splice Loss of Two Fibers, One of Which Is Elliptically Deformed along Its Entire Length. *Journal of Optical Technology*. 2021;88(2):73–78. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-02-73-78>
23. Hall B.C. *Quantum Theory for Mathematicians* (Graduate Texts in Mathematics, 267). New York: Springer; 2013. 566 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7116-5>

Submitted 27.06.2022; approved after reviewing 12.09.2022; accepted for publication 19.10.2022

About the authors:

Vyacheslav A. Gladkikh, Senior Researcher, Computer Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (65 Kim Yu Chen St., Khabarovsk 680000, Russian Federation), Cand. Sci. (Phys.-Math.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3922-9609>, Researcher ID: [GLU-2712-2022](https://orcid.org/0000-0002-3922-9609), gladkih@as.khb.ru

Victor D. Vlasenko, Academic Secretary, Computer Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (65 Kim Yu Chen St., Khabarovsk 680000, Russian Federation), Cand. Sci. (Phys.-Math.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-4532>, Researcher ID: [E-2432-2019](https://orcid.org/0000-0001-7782-4532), vlasenko@as.khb.ru

Contribution of the authors:

V. A. Gladkikh – development of the concept and plan of the article, conducting theoretical research, review and analysis of the literature, formulation of conclusions.

V. D. Vlasenko – calculations, analysis of the results, preparation of the text with subsequent revision.

All authors have read and approved the final manuscript.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 628.9.041.8:631.344.8

doi: 10.15507/2658-4123.032.202204.600-612

Научная статья

Обоснование применения технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц

П. П. Долгих*Красноярский государственный аграрный университет**(г. Красноярск, Российская Федерация)**dpp10@yandex.ru*

Аннотация

Введение. Обеспечение требуемых параметров и характеристик электромагнитного излучения светотехнических облучательных установок для теплиц является важной задачей при повышении эффективности использования энергии и улучшении характеристик растениеводческой продукции. Цель работы – определение эффективного режима работы технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц.

Материалы и методы. В разработанной модели технологической схемы облучения за счет конструктивных решений есть возможности разделить энергетический поток на составляющие и управлять этими потоками. Предложено путем раздельного регулирования напряжения на облучателе и вентиляторе создавать условия для изменения величины отдельных спектральных линий излучения с целью дальнейшей оценки эффекта от данных изменений.

Результаты исследования. Получены результаты по изменению распределения PPFД в зависимости от напряжения на тепличном облучателе от 198 до 242 В и температуры воздуха вблизи лампы от 38 до 47 °С. Сравнение усредненных значений PPFД в исследуемых режимах со значением PPFД в номинальном режиме для этих диапазонов позволило определить режим при напряжении 220 В и температуре воздуха вблизи лампы от 43 до 47 °С как рациональный для практического применения в технологических схемах облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц.

Обсуждение и заключение. Разработка и применение рациональных режимов работы тепличных облучателей, с учетом режимов работы сети и лампы, является основой для обеспечения тепличного производства альтернативной тепловой энергией.

Ключевые слова: промышленные теплицы, технологическая схема облучения, энергетические потоки, тепличный облучатель, распределение энергии излучения по спектру, регулирование напряжения, низкопотенциальная тепловая энергия

© Долгих П. П., 2022



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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Долгих П. П. Обоснование применения технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 600–612. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.600-612>

Original article

Rationale for the Application of the Technological Scheme of Irradiation with Separation of Energy Flows in the Lighting Systems of Industrial Greenhouses

P. P. Dolgikh

Krasnoyarsk State Agrarian University

(Krasnoyarsk, Russian Federation)

dpp10@yandex.ru

Abstract

Introduction. Ensuring the required parameters and characteristics of electromagnetic radiation of lighting irradiation facilities for greenhouses is an important task to improve the efficiency of energy use and the characteristics of crop production. The aim of the work is to determine the effective operation mode of technological irradiation scheme with separation of energy flows in lighting systems of industrial greenhouses.

Materials and Methods. In the developed model of the irradiation technological scheme, constructive decisions make it possible to divide the energy flows into components and to control these flows. It has been proposed that separate regulation of the voltage on the irradiator and the fan can be used to create conditions for changing the values of separate spectral lines of radiation in order to further assess the effect of these changes.

Results. We obtained the results on the change of PPFD distribution depending on the voltage on the greenhouse irradiator from 198 to 242 V and the air temperature near the lamp from 38 to 47°C. The comparison of averaged PPFD values in the studied modes with the PPFD value in the nominal mode for these ranges allowed determining the mode at voltage 220 V and the air temperature near the lamp from 43 to 47°C as a rational for practical use in technological irradiation schemes with energy flows separation in the lighting systems of industrial greenhouses.

Discussion and Conclusion. The development and application of rational modes for operation of greenhouse irradiators, taking into account the modes of network and lamp is the basis for greenhouse production with the use of alternative thermal energy.

Keywords: industrial greenhouses, technological scheme of irradiation, energy flows, greenhouse irradiator, distribution of radiation energy over the spectrum, voltage regulation, low-potential heat energy

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Dolgikh P.P. Rationale for the Application of the Technological Scheme of Irradiation with Separation of Energy Flows in the Lighting Systems of Industrial Greenhouses. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):600–612. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.600-612>

Введение

Технологические операции по облучению растений в тепличной светокультуре являются энергоемкими процессами

и требуют оптимальных решений при разработке мероприятий по повышению эффективности. Применяемые на сегодняшний момент в промышленных теплицах

облучательные установки с газоразрядными лампами высокого давления достигли, путем технического совершенствования, максимальных показателей по критерию эффективной отдачи, но работы по улучшению их характеристик продолжают¹. Однако особенностями, которые необходимо учитывать при эксплуатации, являются повышенные требования к спектральному составу и интенсивности излучения из-за ресурсных изменений, зависящих от срока эксплуатации², отклонения питающего напряжения [1], схем питания источников излучения [2]. Любые отклонения в показателях эффективного потока сказываются как положительно, так и отрицательно на конечном растениеводческом результате и экономических показателях конечной продукции. Также у газоразрядных ламп высокого давления имеется проблема, связанная с неравномерным распределением энергии излучения по спектру. Особенно это касается «синей» части спектра, процент содержания которой низкий, что требует дополнительных мер по коррекции и устранению этого недостатка [3].

Предварительные исследования по повышению энергоэффективности процесса облучения растений позволили установить, что представляется возможным расширить функции светотехнических облучательных установок в теплицах путем использования инфракрасной составляющей излучения облучателя на нужды отопления в системах микроклимата [4].

В ходе экспериментов был установлен ряд зависимостей, позволяющих делать выводы об эффективности применения в системе микроклимата теплиц облучательных установок с функцией принудительного охлаждения

воздушным способом [5]. Управление потоками утилизированной таким образом тепловой энергии, которая затем используется в системе отопления теплиц и является основой для обеспечения тепличного производства дополнительной альтернативной экологически чистой энергией, дает преимущества [6]. При этом были определены новые дополнительные преимущества использования таких установок, заключающиеся в значительном изменении фотосинтетического потока фотонов в функции температуры воздуха вблизи лампы при регулировании уровня напряжения в пределах, регламентированных стандартом. Однако вопросы смещения в отдельных спектральных областях излучения облучательных установок с функцией принудительного охлаждения при изменении внешних факторов, к которым, в частности, относится уровень напряжения в сети, имеющие важное значение в показателях эффективности технологических процессов растениеводства защищенного грунта, не исследованы. Для жизнедеятельности растений особенно необходимы фотосинтетически активная (ФАР) ($\Delta\lambda = 360\text{--}720$ нм) и физиологически активная радиации ($\Delta\lambda = 300\text{--}800$ нм), зависящие от распределения энергии по спектру. Их регулирование дает дополнительные эффекты в управляемом растениеводстве [7].

Целью работы является определение эффективного режима работы технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц.

Обзор литературы

Одним из уровней энергоэкологичности светокультуры в современном представлении является модель

¹ Тепличное освещение. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.reflux.ru/catalog/glighting/> (дата обращения: 10.09.2022).

² Долгих П. П., Кунге Я. А., Цугленок Н. В. Энергосберегающие электронные пускорегулирующие аппараты для облучательных установок теплиц : Красноярск : КрасГАУ, 2003. 116 с.

технологического процесса облучения, где частным показателем энергоэкологичности является спектральный состав излучения [8–10]. При этом определена роль каждого спектрального диапазона. Растения чувствуют и реагируют на оптические спектры от ультрафиолетового излучения (UV) до дальнего красного (FR), а качество излучения или длина волны оптического спектра значительно влияет на рост, развитие, морфологию и вторичный метаболизм растений. Реакция растений на качество излучения зависит от вида и сорта растений. В зависимости от условий окружающей среды реакция растений на одно и то же качество излучения может быть изменена «фоновыми» условиями, например, количеством ФАР, которое растение получает в течение дня (DLI).

Красное (R) излучение воспринимается растениями с помощью *phys* и регулирует реакции, связанные с прорастанием семян, удлинением стебля, расширением листьев, индукцией цветения и т. д. А синее (B) излучение воспринимается *CRYs* и *phots* и регулирует такие процессы, как деэтиоляция рассады, фототропизм, движение хлоропластов, циркадные ритмы, рост корней, устьичного отверстия и т. д. Однако излучения R и B действуют антагонистически в регулировании размера и толщины листа. B-излучение способствует сплющиванию листьев за счет усиления фотоактивности, в то время как R-излучение преимущественно способствует ветвлению, активируя *phyB* [11].

Таким образом, необходимо уделять пристальное внимание определению баланса между R- и B-излучением, чтобы архитектура растений регулировалась в соответствии с поставленной целью. Высокую эффективность этих излучений для фотосинтеза и роста растений легко понять, поскольку они идеально соответствуют пикам поглощения хлорофиллов.

Многочисленные исследования были проведены для оценки влияния R- и B-излучения на накопление вторичных метаболитов растений, и результаты в некоторых случаях противостоят друг другу [12].

Красное и дальнее красное излучения являются важными сигналами для растений, а соотношение R:FR влияет на физиологически регулируемые реакции, такие как прорастание семян, деэтиоляция семян, избегание затенения и репродукция. Было установлено, что добавление к FR-излучению излучения с более короткой длиной волны (400–700 нм) может сбалансировать возбуждение между фотосистемой I (PSI) и PSII, что синергетически увеличивает фотохимию и фотосинтез [13]. PSI и PSII работают последовательно для проведения фотохимических реакций, которые предпочтительно возбуждаются FR- и коротковолновым излучением соответственно [14]. Одна из гипотез гласит, что фотосинтетическая эффективность растений, выращенных при комбинированном FR- и коротковолновом излучении, должна быть увеличена из-за лучшего баланса между возбуждением двух фотосистем, в то время как некоторые исследователи предположили, что эффективность фотосинтеза всего растения будет снижена из-за более низкой PFD [15; 16]. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы лучше понять влияние FR-излучения на фотосинтез растений.

Зеленое (G) излучение действует как сигнал, регулирующий нефотосинтетические реакции растений, такие как вегетативный рост, накопление антоцианов и инициация цветения посредством *phys* и *cru* [17]. Реакция растений на G-излучение похожа на FR-излучение и имеет общую тенденцию противостоять реакциям, индуцированным B- или R-излучениями [18; 19]. Кроме того, в то время как лучи B и R

сильно поглощаются верхними листьями, излучение G проникает в более глубокие слои растительного покрова, что потенциально может повысить урожайность [17].

UV-излучение обычно рассматривается как фактор стресса для роста растений из-за избыточной энергии возбуждения, неизбежно приводящей к образованию активных форм кислорода в растительных органеллах, таких как хлоропласты, митохондрии и пероксисомы. В последнее время большое внимание уделяется использованию дополнительного УФ-излучения для индукции синтеза фитохимических веществ в растениях, таких как антоцианы, флавоноиды, каротиноиды, глутатион и другие биоактивные метаболиты, которые полезны для здоровья [20; 21]. Дополнительное УФ-В-излучение повышало концентрацию антоцианов, фенолов и флавоноидов в зеленых листьях базилика на 9–18 %, 28–126 % и 80–169 % соответственно, а антиоксидантная способность листьев базилика положительно коррелировала с дозами УФ-В-излучения. Однако дополнительное УФ-В-излучение в целом снижало урожайность как зеленого, так и фиолетового базилика. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, чтобы найти точку равновесия между повышением питательных качеств и снижением урожайности.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась технологическая схема, в которой применяется облучательная установка с функцией принудительного охлаждения воздушным способом. Предмет исследования – закономерности влияния напряжения сети и температуры воздуха вблизи лампы на отдельные спек-

ральные линии излучения тепличного облучателя. На рисунке 1 представлена технологическая схема установки для исследования тепличного облучателя.

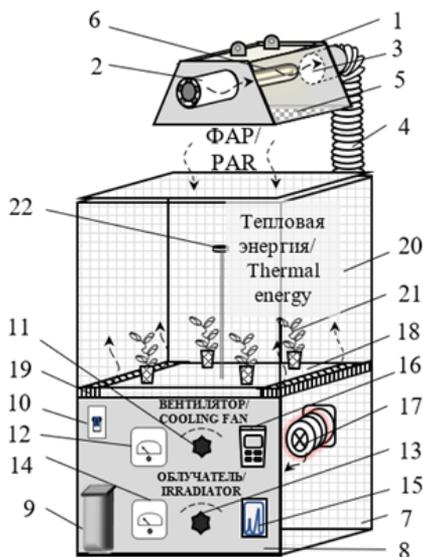
Исследования проводились с тепличным облучателем FitoTech CoolMaster 125 с лампой SON-T 1000 W E40 с номинальным фотосинтезным потоком фотонов (PPF), равным 1 700 мкмоль/с, расположенным над вегетационной камерой с приборной панелью, изображенной на рисунке 1. При работе в номинальном режиме при $U = 220$ В и отсутствии принудительного охлаждения колба лампы может нагреваться до 450 °С³. Для работы лампы использовался электромагнитный независимый пускорегулирующий аппарат 1K1000 ДНаТ46-001 фирмы GALAD.

Стандартный спектр излучения исследуемой лампы в номинальном режиме работы представлен на рисунке 2⁴. Как видно, спектр излучения можно поделить на пять диапазонов с длиной волны λ от 300 до 800 нм и $\Delta\lambda=100$ нм. Большая часть излучения лампы расположена в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 500$ –600 нм (50 %) и $\Delta\lambda = 600$ –700 нм (37 %). В синем диапазоне $\Delta\lambda = 400$ –500 нм спектр излучения составляет 4,5 %.

В качестве вентилятора охлаждения применяли Домовент 100 ВКО D100 мм 14 Вт с производительностью 105 м³/ч. Скорость воздушного потока (v_v , м/с) на выходе из гофрированного теплоотвода 4 и температуру воздуха вблизи лампы (T_v , °С) напротив выпускного фланца 3 измеряли анемометром Мегеон 11002, снимали спектрограммы и определяли плотность фотосинтетического потока фотонов (PPFD, мкмоль/(м²·с)), спектрометром PAR OHSP350P на расстоянии 1 м от тепличного облучателя.

³ SON-T 1000W E40 1SL/4. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: https://www.lighting.philips.ru/prof/lamps/high-intensity-discharge-lamps/son-high-pressure-sodium/dsont/928154509228_EU/product (дата обращения: 10.09.2022).

⁴ Там же.

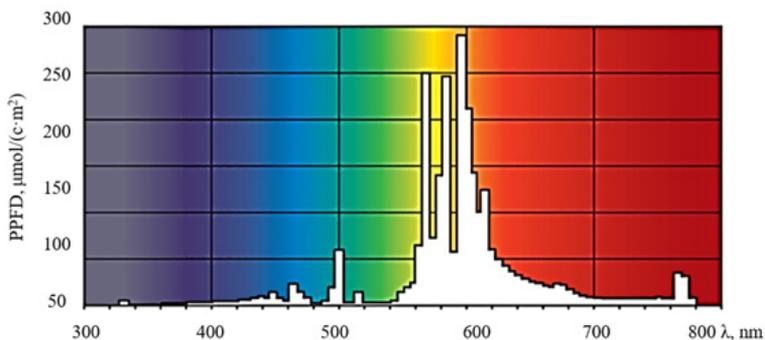


Р и с. 1. Технологическая схема установки для исследования тепличного облучателя:

- 1 – облучатель; 2 – вентилятор канальный в патрубке; 3 – выпускной фланец;
 4 – гофрированный теплоотвод; 5 – закаленное стекло; 6 – лампа; 7 – технологический отсек;
 8 – приборная панель; 9 – пускорегулирующий аппарат; 10 – автоматический выключатель;
 11 – регулировочная ручка для лабораторного автотрансформатора вентилятора;
 12 – вольтметр для вентилятора; 13 – регулировочная ручка для лабораторного
 автотрансформатора облучателя; 14 – вольтметр для облучателя; 15 – спектрофотометр ФАР;
 16 – анемометр; 17 – датчик анемометра; 18 – горизонтальная перегородка;
 19 – вентиляционные каналы; 20 – камера для выращивания; 21 – растения;
 22 – датчик спектрофотометра ФАР

F i g. 1. Technological scheme of the installation for the study of the greenhouse irradiator:

- 1 – irradiator; 2 – duct fan in the nozzle; 3 – outlet flange; 4 – corrugated heat sink;
 5 – tempered glass; 6 – lamp; 7 – process compartment; 8 – dashboard; 9 – start-up device;
 10 – circuit breaker; 11 – adjustment knob for laboratory autotransformer fan;
 12 – voltmeter for the fan; 13 – adjustment knob for the laboratory autotransformer of the irradiator;
 14 – voltmeter for the irradiator; 15 – spectrophotometer PAR; 16 – anemometer;
 17 – anemometer sensor; 18 – horizontal partition; 19 – ventilation ducts; 20 – growing chamber;
 21 – plants; 22 – spectrophotometer sensor PAR



Р и с. 2. Распределение энергии излучения по спектру⁵

F i g. 2. Distribution of radiation energy in spectrum

⁵ Там же.

Регулирование напряжения осуществляли с помощью двух лабораторных автотрансформаторов, позволяющих независимо друг от друга управлять работой вентилятора охлаждения и тепличного облучателя. Был исследован диапазон напряжений на тепличном облучателе ($U_{об}$, В) от 198 до 242 В с $\Delta U = 22$ В⁶. Эксперимент проходил в следующей последовательности. Первоначально с помощью лабораторного автотрансформатора для тепличного облучателя устанавливали номинальное напряжение $U_{об2} = 220$ В. После этого с помощью лабораторного автотрансформатора для вентилятора охлаждения устанавливали последовательно с временным интервалом в 5 мин три уровня напряжения (U_B): 198, 220, 242 В – с целью регулирования скорости и температуры воздушного потока. При этом измеряли PPFД в пяти спектральных диапазонах: UV, B, G, R, FR. Далее эксперимент проводили при уровне напряжения на тепличном облучателе $U_{об1}=198$ В и $U_{об3}=242$ В.

Результаты исследования

Было установлено, что при одинаковом характере изменения v_B во всех трех режимах при регулировании U_B (так, при $U_{B1} = 198$ В $v_{B1} = 2,7$ м/с; при $U_{B2} = 220$ В $v_{B2} = 3,0$ м/с; $U_{B3} = 242$ В $v_{B3} = 3,4$ м/с) T_B изменялась неравномерно (рис. 3).

На рисунке 3 представлены данные по изменению распределения PPFД в зависимости от исследуемых факторов ($U_{об}$ и T_B). Каждый график содержит для сравнения спектральные линии излучения лампы в номинальном режиме. Графики демонстрируют искажение отдельных спектральных линий излучения по сравнению с номинальным режимом.

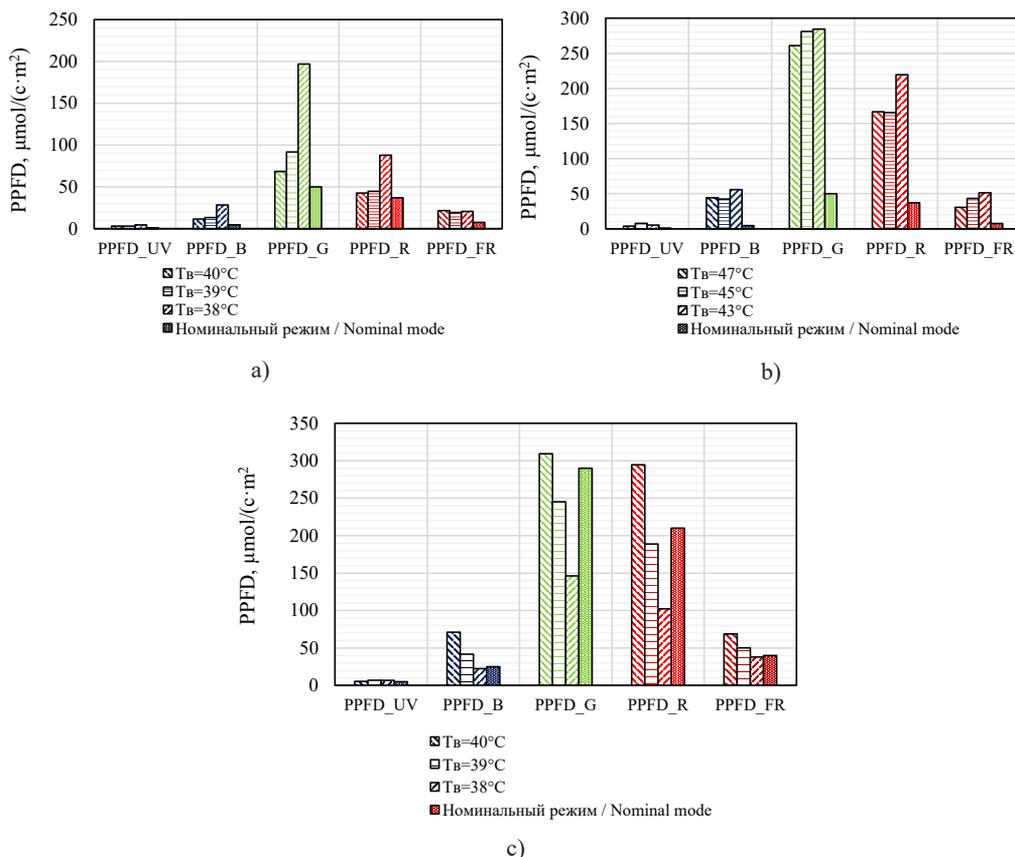
Для оценки степени влияния исследуемых факторов на искажение спектра

сравнивали усредненное значение PPFД в каждом спектральном диапазоне со значением PPFД в номинальном режиме для этих диапазонов (рис. 4).

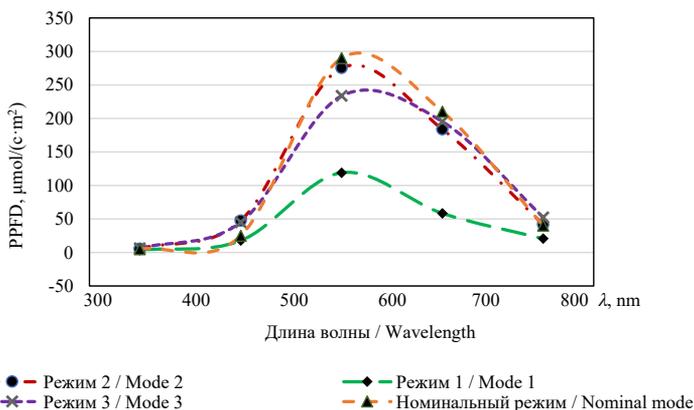
Графики демонстрируют существенное влияние $U_{об}$ и T_B на количественное распределение энергии по отдельным спектральным линиям и, как следствие, на технологию процесса выращивания, учитывая роль каждого спектрального диапазона по отдельности в эффективности процессов, определяющих физиологию и продуктивность растений. Так, в режиме 1 значение PPFД снижается во всем исследуемом диапазоне длин волн по сравнению с номинальным режимом: $\Delta\lambda = 300\text{--}400$ нм на 1,44 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 400\text{--}500$ нм на 7,3 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 500\text{--}600$ нм на 171 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 600\text{--}700$ нм на 151,6 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 700\text{--}800$ нм на 19,5 мкмоль/(м²·с). В режиме 3 значение PPFД держится в допустимых пределах во всем исследуемом диапазоне, однако снижается в $\Delta\lambda = 500\text{--}600$ нм на 56 мкмоль/(м²·с). Полученные результаты позволяют сделать вывод о невозможности применения на практике режимов работы облучателя при напряжении 198 и 242 В.

В режиме 2 значение PPFД стабильно во всем исследуемом диапазоне, что делает этот режим наиболее рациональным для практического применения в технологических схемах облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц. Важным преимуществом этого режима является увеличение доли PPFД в «синей» области излучения ($\Delta\lambda = 400\text{--}500$ нм), по сравнению с номинальным режимом, в 1,9 раза: с 25 до 47 мкмоль/(м²·с). Данное обстоятельство позволяет сделать вывод

⁶ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. : ФГУП «Стандартинформ». 2014. 19 с. URL: https://cenerg.ru/files/Norm_lab/gost-32144-2013.pdf (дата обращения: 10.09.2022).



Р и с. 3. Изменение распределения PPFD в зависимости от U_{06} и T_B :
 a) $U_{061} = 198 \text{ V}$ (режим 1); b) $U_{062} = 220 \text{ V}$ (режим 2); c) $U_{063} = 242 \text{ V}$ (режим 3)
 F i g. 3. Change in PPFD distribution depending on the U_{06} and T_B :
 a) $U_{061} = 198 \text{ V}$ (mode 1); b) $U_{062} = 220 \text{ V}$ (mode 2); c) $U_{063} = 242 \text{ V}$ (mode 3)



Р и с. 4. Графики усредненных значений PPFD в исследуемых режимах
 F i g. 4. Graphs of averaged PPFD values in the studied modes

о повышении эффективности излучения исследуемой лампы без внесения изменений в конструкцию самой лампы, что является новым способом, в отличие от известных⁷.

Полученные данные являются основанием для определения качественного влияния изменения распределения PPFD в среднем на эффективность процесса облучения с учетом спектра действия фотосинтеза по К. Дж. Маккри, а также функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения.

Для оценки спектральных характеристик источника оптического излучения на основе процентного распределения в спектральных участках ФАР используем методику, изложенную в другом исследовании⁸. Расчет производили для двух режимов: номинальный режим и режим 2.

Условное представление усредненной спектральной плотности оптического излучения исследуемой лампы SON-T 1000 W E40 в номинальном режиме и режиме 2 приведено на рисунке 5. Новым, в отличие от известной методики, является то, что оценка проводится не по

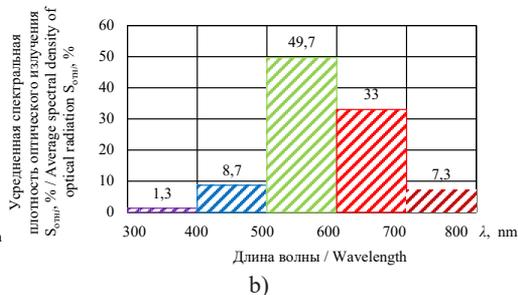
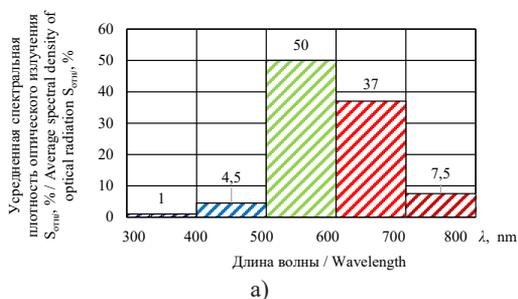
трем спектральным диапазонам, учитывая только ФАР, а по пяти, с учетом физиологического воздействия.

Расчет относительного спектрального распределения, с учетом физиологического воздействия, произведем по формуле (1):

$$\sum_{300}^{800} S_{\text{отн}} K_{\phi}(\lambda_i) = S_{\text{отн1}} K_{\phi}(\lambda_1) + S_{\text{отн2}} K_{\phi}(\lambda_2) + S_{\text{отн3}} K_{\phi}(\lambda_3) + \dots + S_{\text{отн4}} K_{\phi}(\lambda_4) + S_{\text{отн5}} K_{\phi}(\lambda_5), \quad (1)$$

$K_{\phi}(\lambda_i)$ – функция спектральной фотосинтетической эффективности излучения; λ_i – условные характерные длины волн, существенные для основных процессов в растениях.

Приблизительно можно принять, учитывая спектр действия фотосинтеза по К. Дж. Маккри [22], $K_{\phi}(\lambda_1) = 0,4$; $K_{\phi}(\lambda_2) = 0,55$; $K_{\phi}(\lambda_3) = 0,75$; $K_{\phi}(\lambda_4) = 1$; $K_{\phi}(\lambda_5) = 0,3$ при $\lambda_1 = 320$ нм; $\lambda_2 = 445$ нм; $\lambda_3 = 570$ нм; $\lambda_4 = 680$ нм; $\lambda_5 = 760$ нм. Учитывая функцию спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения⁹,



Р и с. 5. Условное представление усредненной спектральной плотности оптического излучения лампы SON-T 1000 W E40: а) в номинальном режиме; б) в режиме 2

Fig. 5. Conditional representation of the averaged spectral density of optical radiation of the SON-T 1000 W E40 lamp: a) in nominal mode; b) in mode 2

⁷ Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга, Г. В. Бооса. 4-е изд. перераб. и доп. М., 2019. 892 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26707983> (дата обращения: 10.09.2022); Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.

⁸ Цугленок Н. В., Долгих П. П., Кунгс Я. А. Энергетическое оборудование тепличных хозяйств. Красноярск: КрасГАУ, 2001. 139 с.

⁹ Справочная книга по светотехнике...

$K_{\phi}(\lambda_1) = 0,4$; $K_{\phi}(\lambda_2) = 0,65$; $K_{\phi}(\lambda_3) = 0,8$; $K_{\phi}(\lambda_4) = 0,7$; $K_{\phi}(\lambda_5) = 0,6$ при $\lambda_1 = 380$ нм; $\lambda_2 = 420$ нм; $\lambda_3 = 540$ нм; $\lambda_4 = 680$ нм; $\lambda_5 = 740$ нм.

На рисунке 6 представлены графические зависимости, построенные по данным, полученным по формуле (1), с учетом физиологического воздействия излучения лампы в исследуемых режимах.

Из рисунка 6 видно, что за счет смещения относительного спектрального распределения эффективность физиологического воздействия излучения от лампы в режиме 2, в сравнении с номинальным режимом, изменяется незначительно. Так, при обоих режимах работы при оценке физиологического воздействия по кривой К. Дж. Маккри эффективность составляет около 78–80 %. При оценке эффективности рассматриваемой технологической схемы с учетом функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения значение относительного спектрального распределения составляет около 74 % в обоих режимах.

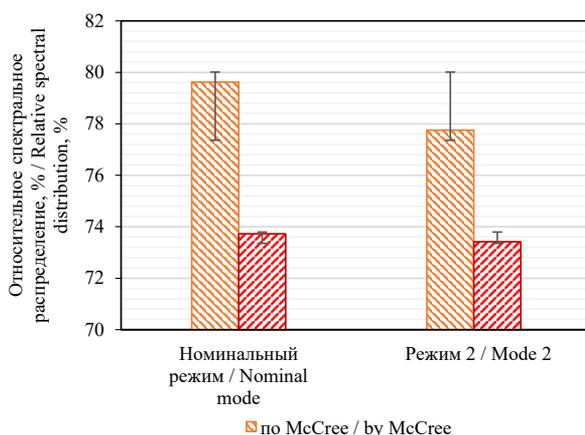
Обсуждение и заключение

Полученные результаты позволяют сделать выводы о возможности практического применения технологической

схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц. В ходе исследования было установлено, что снижение тепловой нагрузки на источнике излучения воздушным принудительным способом позволит обеспечить промышленные теплицы низкопотенциальной экологически чистой тепловой энергией с температурой теплоносителя 43–47 °С, одновременно не искажая в целом спектральную составляющую излучения облучательной установки при напряжении 220 В, получая дополнительное преимущество в виде увеличения доли «синей» составляющей в общем спектре излучения лампы.

Произведенная оценка физиологического воздействия, с учетом спектра действия фотосинтеза по К. Дж. Маккри и функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения, подтвердила гипотезу о применимости разрабатываемых способов облучения с разделением энергетических потоков от облучателя для повышения энергоэкологичности светокультуры.

В дальнейшем разработка и применение рациональных режимов и схем работы тепличных облучателей может



Р и с. 6. Относительное спектральное распределение
F i g. 6. Relative spectral distribution

стать основой для обеспечения тепличного производства дополнительной альтернативной энергией. Стабилизация режимов работы сети с одновременным регулированием температуры теплоносителя при воздушном способе отвода тепловой нагрузки является еще одним способом управления спектральными характеристиками источника

излучения, а вместе с этим и ростовыми процессами растений. Снижение температуры элементов тепличного облучателя позволит более рационально распределять энергетический поток в пространстве, а также создавать дополнительный поток тепловой энергии, необходимый для отопления промышленных теплиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гулин С. В., Пиркин А. Г. Оценка влияния нестабильности питающего напряжения на эффективность функционирования облучательных установок в сооружениях защищенного грунта // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 40. С. 256–261. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24853415> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Гулин С. В., Карпов В. Н., Карлин В. И. О работе разрядных ламп с регулируемым питанием в селекционных установках // Светотехника. 1986. № 6. С. 11–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29267226> (дата обращения: 10.09.2022).
3. Аюпов М. Р., Ракутько С. А. О возможности коррекции спектра натриевой лампы с помощью светодиодного источника под требования светокультуры // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 1. С. 5–13. URL: <https://clck.ru/32djen> (дата обращения: 10.09.2022).
4. Долгих П. П., Самойлов М. В. Расширение функций облучательных установок при использовании в системе регулирования микроклимата теплиц // Вестник ИрГСХА. 2016. № 72. С. 130–138. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27422680> (дата обращения: 10.09.2022).
5. Долгих П. П., Доценко Д. С. Оценка эффективности тепличного облучателя с принудительным охлаждением // Вестник НГИЭИ. 2018. № 10. С. 29–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36386537> (дата обращения: 10.09.2022).
6. Dolgikh P. P., Parshukov D. V., Shaporova Z. E. Technology for Managing Thermal Energy Flows in Industrial Greenhouses [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537, Issue 6. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062041>
7. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2nd ed. Academic press, 2020. 516 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00969-X>
8. Энергоэкология светокультуры – новое междисциплинарное научное направление / С. А. Ракутько [и др.] // АгроЭкоИнженерия. 2016. № 90. С. 14–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27530042> (дата обращения: 10.09.2022).
9. Ракутько С. А. Энергоэкологические основы наилучших доступных технологий светокультуры // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 1. С. 44–60. URL: <https://clck.ru/32dnLp> (дата обращения: 10.09.2022).
10. Ракутько С. А. Энергоэкологичность как свойство искусственной биоэнергетической системы светокультуры // АгроЭкоИнженерия. 2018. № 2. С. 78–89. doi: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>
11. Anpo M., Fukuda H., Wada T. Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation. Amsterdam : Elsevier, 2018. 434 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00580-3>
12. Meng X., Xing T., Wang X. The Role of Light in the Regulation of Anthocyanin Accumulation in Gerbera Hybrida // Plant Growth Regulation. 2004. Vol. 44. P. 243–250. doi: <https://doi.org/10.1007/s10725-004-4454-6>
13. Zhen S., Van Iersel M. W. Far-Red Light Is Needed for Efficient Photochemistry and Photosynthesis // Journal of Plant Physiology. 2017. Vol. 209. P. 115–122. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>

14. Finding the Optimal Growth-Light Spectrum for Greenhouse Crops / S. W. Hogewoning [et al.] // ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. P. 357–363. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.41>
15. Plant Responses to Red and Far-Red Lights, Applications in Horticulture / S. Demotes-Mainard [et al.] // Environmental and Experimental Botany. 2016. Vol. 121. P. 4–21. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2015.05.010>
16. Park Y., Runkle E. S. Far-Red Radiation Promotes Growth of Seedlings by Increasing Leaf Expansion and Whole-Plant Net Assimilation // Environmental and Experimental Botany. 2017. Vol. 136. P. 41–49. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2016.12.013>
17. Wang Y., Folta K. M. Contributions of Green Light to Plant Growth and Development // American Journal of Botany. 2013. Vol. 100, Issue 1. P. 70–78. doi: <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.1200354>
18. Reversal by Green Light of Blue Light-Stimulated Stomatal Opening in Intact, Attached Leaves of Arabidopsis Operates Only in the Potassium-Dependent, Morning Phase of Movement / L. D. Talbott [et al.] // Plant Cell Physiol. 2006. Vol. 47, Issue 3. P. 332–339. doi: <https://doi.org/10.1093/pcp/pci249>
19. Folta K. M., Maruhnich S. A. Green Light: a Signal to Slow Down or Stop // Journal of Experimental Botany. 2007. Vol. 58, Issue 58. P. 3099–3111. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erm130>
20. Bantis F., Ouzounis T., Radoglou K. Artificial LED Lighting Enhances Growth Characteristics and Total Phenolic Content of Ocimum Basilicum, but Variably Affects Transplant Success // Scientia Horticulturae. 2016. Vol. 198. P. 277–283. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>
21. The Effects of Different UV-B Radiation Intensities on Morphological and Biochemical Characteristics in Ocimum Basilicum L. / J. Sakalauskaite [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2013. Vol. 93. P. 1266–1271. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5879>
22. McCree K. J. The Action Spectrum, Absorbance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants // Agricultural Meteorology. 1972. Vol. 9. P. 192–216. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)

Поступила 12.09.2022; одобрена после рецензирования 13.10.2022; принята к публикации 03.11.2022

Об авторе:

Долгих Павел Павлович, доцент кафедры системознергетики Института инженерных систем и энергетики Красноярского государственного аграрного университета (660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр-т Мира, д. 90), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>, Researcher ID: GRJ-9791-2022, dpp10@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gulin S.V., Pirkin A.G. Assessing the Impact of Unstable Voltage on the Performance of the Irradiation Facilities in Buildings Protected Ground. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2015;(40):256–261. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24853415> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Gulin S.V., Karpov V.N., Karlin V.I. [On the Operation of Discharge Lamps with Regulated Power Supply in Breeding Facilities]. *Svetotekhnika*. 1986;(6):11–13. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29267226> (accessed 10.09.2022). (In Russ.)
3. Ayupov M.R., Rakutko S.A. O Led-Based Correction of Sodium Lamp Light Quality for Indoor Plant Lighting Demands. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018;(1):5–13. Available at: <https://clck.ru/32djcn> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Dolgikh P.P., Samoilo V.M. Function Enhancement of Irradiation Facility for Using in Microclimate Regulation System of Greenhouses. *Vestnik IRGSHA*. 2016;(72):130–138. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27422680> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Dolgikh P.P., Dotsenko D.S. Evaluation of the Effectiveness of a Hothouse Irradiator with Forced Cooling. *Vestnik NGIEI*. 2018;(10):29–44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36386537> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Electrical technologies and equipment

6. Dolgikh P.P., Parshukov D.V., Shaporova Z.E. Technology for Managing Thermal Energy Flows in Industrial Greenhouses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;537(6). doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062041>
7. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2nd ed. Academic press; 2020. 516 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00969-X>
8. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Energy and Ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting as a New Interdisciplinary Research Area. *AgroEkoInzheneriya*. 2016;(90):14–27. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27530042> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktivii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;(1):44–60. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27530042> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *AgroEkoInzheneriya*. 2018;(2):78–89. doi: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>
11. Anpo M., Fukuda H., Wada T. Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation. Amsterdam: Elsevier; 2018. 434 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00580-3>
12. Meng X., Xing T., Wang X. The Role of Light in the Regulation of Anthocyanin Accumulation in Gerbera Hybrida. *Plant Growth Regulation*. 2004;44:243–250. doi: <https://doi.org/10.1007/s10725-004-4454-6>
13. Zhen S., Van Iersel M.W. Far-Red Light Is Needed for Efficient Photochemistry and Photosynthesis. *Journal of Plant Physiology*. 2017;209:115–122. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>
14. Hogewoning S.W., Trouwborst G., Meinen E., van Ieperen W. Finding the Optimal Growth-Light Spectrum for Greenhouse Crops. In: ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. p. 357–363. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.41>
15. Demotes-Mainard S., Péron T., Corot A., et al. Plant Responses to Red and Far-Red Lights, Applications in Horticulture. *Environmental and Experimental Botany*. 2016;121:4–21. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2015.05.010>
16. Park Y., Runkle E.S. Far-Red Radiation Promotes Growth of Seedlings by Increasing Leaf Expansion and Whole-Plant Net Assimilation. *Environmental and Experimental Botany*. 2017;136:41–49. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2016.12.013>
17. Wang Y., Folta K.M. Contributions of Green Light to Plant Growth and Development. *American Journal of Botany*. 2013;100(1):70–78. doi: <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.1200354>
18. Talbott L.D., Hammad J.W., Harn L.C., et al. Reversal by Green Light of Blue Light-Stimulated Stomatal Opening in Intact, Attached Leaves of Arabidopsis Operates Only in the Potassium-Dependent, Morning Phase of Movement. *Plant Cell Physiol*. 2006;47(3):332–339. doi: <https://doi.org/10.1093/pcp/pci249>
19. Folta K.M., Maruhnich S.A. Green Light: a Signal to Slow Down or Stop. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58(58):3099–3111. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erm130>
20. Bantis F., Ouzounis T., Radoglou K. Artificial LED Lighting Enhances Growth Characteristics and Total Phenolic Content of Ocimum Basilicum, but Variably Affects Transplant Success. *Scientia Horticulturae*. 2016;198:277–283. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>
21. Sakalauskaite J., Viskelis P., Dambrauskienė E., et al. The Effects of Different UV-B Radiation Intensities on Morphological and Biochemical Characteristics in Ocimum Basilicum L. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013;93:1266–1271. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5879>
22. McCree K.J. The Action Spectrum, Absorbance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants. *Agricultural Meteorology*. 1972;9:192–216. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)

Submitted 12.09.2022; approved after reviewing 13.10.2022; accepted for publication 03.11.2022

About the author:

Pavel P. Dolgikh, Associate Professor of the Chair of Systems Power Engineering, Institute of Engineering Systems and Power Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University (90 Prospekt Mira, Krasnoyarsk 660049, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>, Researcher ID: GRJ-9791-2022, dpp10@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.



Studying the Thermophysical Characteristics of the Muscle Mass of the Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia Illucens*) as a Drying Object

V. A. Doroshenko , I. A. Khozyaev, D. A. Yakovlev,
A. A. Doroshenko, A. A. Shcherbakov

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

 valy11164@mail.ru

Abstract

Introduction. The main component of the compound feedstuff is fish meal, which has unstable quality and high price. Fish and meat-and-bone meals are replaced with protein concentrates and higher quality larvae proteins. The source of feed protein is the biomass of the black soldier flies (*Hermetia illucens*), which have a rich amino acid composition and also process food waste. The aim of the work is to study the thermal-physical characteristics of the muscle mass of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*).

Materials and Methods. The study focused on the muscle mass of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). The subject of the study is thermal-physical regularities during the drying process. The studies were conducted on the basis of Don State Technical University. The article describes determination of thermal-physical characteristics such as specific heat, thermal conductivity, moisture of the raw material, and oiliness.

Results. Heat conductivity coefficient of water 0.555 W/(m·K) for food and feed products from 0.25 to 0.40 W/(m·K) black Soldier Fly larvae have a heat conductivity equal to 0.144 W/(m·K), which is lower than conventional feedstuff components. The humidity of the examined raw material is 45% or higher while the heat conductivity remains linear and practically does not increase.

Discussion and Conclusion. The results obtained during the work can be used for parameter determination and design of various types of dryers, and for mathematical description of the dynamics and kinetics of drying.

Keywords: biomass, compound feedstuff, black soldier fly larvae, drying, specific heat, protein

Acknowledgements: We express gratitude to the scientific and pedagogical team of the Chair of Food Engineering and Technology of Don State Technical University. We also thank the reviewers of this article.

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

For citation: Doroshenko V.A., Khozyaev I.A., Yakovlev D.A., et al. Studying the Thermophysical Characteristics of the Muscle Mass of the Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia Illucens*) as a Drying Object. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):613–629. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.613-629>



Исследование теплофизических характеристик мышечной массы личинок черной львинки (*Hermetia illucens*) как объекта сушки

В. А. Дорошенко , И. А. Хозяев, Д. А. Яковлев,
А. А. Дорошенко, А. А. Щербаков

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

 valy11164@mail.ru

Аннотация

Введение. Основной компонент комбикорма – рыбная мука, которая имеет нестабильное качество и высокую цену. На замену рыбной, мясокостной муке приходят протеиновые концентраты, ресурсосберегающий белок более высокого качества. Источником кормового белка выступает биомасса личинок черной львинки (*Hermetia illucens*), которые обладают богатым аминокислотным составом, а также перерабатывают пищевые отходы. Цель работы – исследование теплофизических характеристик мышечной массы личинок черной львинки (*Hermetia illucens*).

Материалы и методы. Объект исследования – мышечная масса личинок черной львинки (*Hermetia illucens*). Предмет исследования – теплофизические закономерности, протекающие при сушке. Исследования проводились на базе Донского государственного технического университета. В работе описано определение теплофизических характеристик, таких как удельная теплоемкость, теплопроводность, влажность исходного сырья, масличность.

Результаты исследования. Коэффициент теплопроводности воды 0,555 Вт/(м·К) для пищевых и кормовых продуктов от 0,25 до 0,40 Вт/(м·К), мышечная масса личинок черной львинки имеет теплопроводность, равную 0,144 Вт/(м·К), что ниже, чем у привычных кормовых компонентов. Влажность исследуемого сырья 45 % и выше. Теплопроводность при этом остается линейной и практически не возрастает.

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные в ходе работы, могут использоваться для расчета и проектирования сушилок различного типа, а также при математическом описании процесса динамики и кинетики сушки.

Ключевые слова: биомасса, комбикорм, личинки черной львинки, сушка, удельная теплоемкость, протеин

Благодарности: выражаем признательность научно-педагогическому коллективу кафедры техники и технологий пищевых производств ФБГОУ ВО «ДГТУ» и испытательной лаборатории биохимического и спектрального анализа пищевых продуктов. Благодарим рецензентов данной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование теплофизических характеристик мышечной массы личинок черной львинки (*Hermetia illucens*) как объекта сушки / В. А. Дорошенко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 613–629. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.613-629>

Introduction

Fishing industry is one of the important strategic directions for ensuring world food security. The development of this industry depends on the stocks of fish

food. The demand for mixed fish food is only increasing every year. In Russia, according to the Federal Agency for Fisheries, no more than 100 thousand tons of feed are produced for aquaculture, while

the current needs of the industry exceed 250 thousand tons¹. For 2021 in Russia, there were produced 4,918 tonnes of fish food that is 0.36 times less than in 2020, while global feed production according to analysts from Oil World decreased by 5% [1–4]. The decline can be caused by several factors: reduction in cereal production as a result of drought and low rainfall, environmental disasters in the oceans (oil spills, loss of a large barrier reef, etc.), reduction in the number of fish species and, subsequently, in fish meal, economic preconditions associated with an increase in the prices of processed fish food and imported fish meal. Such companies as Le Gouessant, Biomar, Coppens, Aller Aqua, Skretting are still the world leader in the production of high-value fish feed. Fish meal is the main component and, as mentioned above, production is declining. Scientists around the world have long been puzzled by this problem and the search for alternative sources of proteins other than existing ones [5–9]. Today, there is already a trend to replace meat-and-bone meal with alternative sources of protein of stable quality and environmentally friendly in the form of insect biomass. There are 1,900 species of edible insects in the world. The most common insects consumed are beetles (Coleoptera) – 31% of the total. Among the most promising species for industrial feed production are black soldier fly (*Hermetia illucens*), silkworms (*Anaphe panda*), fly (*Muca Domestica*) and mealworms (*Tenebrio molitor*). Grasshoppers (*Oxya fuscovittata*, *Acrida exaltata*, *Hieroglyphus banian*) and termites (*Trinervitermes*) are also used, but to a lesser extent [10–13].

To date, there are studies related to the addition of whole black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) to the diet of pigs [14; 15], the purpose of the study was

to evaluate the effectiveness of introducing black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) to the diet of store pigs. The study was conducted in 2016–2017, when for feeding, there was used the dried biomass of larvae and prepupae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) in the amount of 7.0%. There was conducted a physiological experiment on 3 experimental groups of hybrid boletuses (*Sus scrofa domesticus* Erxleben) during 27 days. The results of the experiment showed a positive effect. The average daily live weight gain in the experimental group, which was fed with food with the addition of 7.0% of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*), was 6.1% more compared to the control group, which was fed with a routine diet. Such a study is not a single one. In other countries, insects have long been a source of a new feed protein to be used in feeding farm animals [16; 17]. The studies also revealed a positive effect on the live weight gain of experimental groups of pigs.

However, in addition to the good results of studies in feeding pigs with the addition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*), there are studies conducted by domestic scientists N. A. Ushakova, S. V. Ponomarev, and others on the effect of new feed additives in the form of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) when growing tilapia (cichlid family) and rainbow trout in recirculating water supply systems (RAS) [18; 19]. The results of the studies showed that the use of such a feed additive has a positive effect on the digestive tract, however, the passage of this feed increased by 35% compared to the traditional ration.

The research conducted by S. V. Ponomarev on the digestibility of chitin of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) with valuable fish species, such as rainbow trout and sturgeon, showed that

¹ Federal Agency for Fisheries. Available at: <https://clck.ru/32in5z> (accessed 12.11.2022). (In Russ.)

the presence of a large amount of polysaccharides (including chitin) in the black soldier fly larvae makes it difficult to digest feed, this because the lack of the special enzyme chitinase. In addition, chitin can negatively affect the access of proteinase to feed, and as a result, the absorption of proteins and fats decreases². The chitin content in the outer skeleton (cuticle) of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) is up to 8%. Accordingly, in order to be added to fish food, chitin must be removed, and only the inner part (muscle part) of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) should be used. But before adding to the feed, the muscle part must be prepared, namely dried, since its moisture content can reach up to 45%, and sometimes up to 60%, depending on the substrate on which the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) were grown. Such moisture content does not allow long-term storage and use of the muscle part of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) in feed production, so the drying process is the main task when preparing the feed component.

Protein concentrate from the black soldier fly larvae is a good source of essential amino acids when added to a feed mixture for aquaculture [19–23]. Today, the technology for producing protein meal from insects is not publicly available and is a trade secret. Therefore, for the production of protein concentrate, a special technology was developed at the Department of Technique and Technology of Food Productions of Don State Technical University (DSTU). This technology includes a number of operations, such as separating of shell (chitin), drying of the intestines and chitin, squeezing of fat, and grinding. Drying is one of the most energy

intensive processes and one of the most difficult. Due to the fact that raw materials under study are non-standard and little studied, drying process touches upon such problems as: influence of drying temperature on the quality of finished products, fat burning process [24–27], mass exchange processes, rheological properties of raw materials during drying and many others. Today, there are many ways to dry viscous material. They are microwave drying, vacuum drying, inductive drying, infrared one, etc. Choosing the drying method affects how much protein in the material can be preserved. Entoprotek Company, located in the Russian Federation, is engaged in breeding and processing the black soldier flies on an industrial scale, and produces drying with 4 different types of dryers. However, all these methods have a high degree of energy consumption of the drying process with different degree of preservation of the properties of raw materials. A promising method of drying the studied raw materials (biomass of the black soldier fly larvae) is infrared drying [18; 28–30].

However, there are still unresolved issues related to the parameters of the drying unit and the quality of the raw materials to be dried.

The aim of the article is to study the thermophysical characteristics of the muscle mass of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for constructing a mathematical model of drying and for developing a drying unit.

Literature Review

The insect production and consumption industry is developing rapidly, and the demand for new products, both in pure form and as ingredients (protein concentrates, flour, fat, etc.), is increasing. Insect processing is practiced all over the

² Ponomarev S.V. [Study of the Digestibility of Chitin in Black Soldier Fly Larvae by Sturgeon, Trout and Tilapia]. 2018. Available at: URL: <https://hermetia.ru/otchet-po-perevarivaemosti-xitina-u-ryb/> (accessed 12.11.2022). (In Russ.)

world³ [31–33]. There are different processing technologies depending on the type of insects, but there are general principles. For example, D. Azzolini in his works considered the influence of drying regimes and hygroscopicity of meal worm larvae (*Tenebrio molitor*) on qualitative characteristics [34]. D. Azzolini performed the blanching before air-drying at 50, 60 and 70°C, and sorption isotherms were studied after air-drying and sublimation drying. The studies resulted in moisture diffusion coefficients of D 4.85 10⁻¹¹ and 1.62 10⁻¹⁰ m²/s. He also described the dependencies of the Arrhenius equation, estimating at 52.1 kJ/mole. The Guggenheim – Anderson – de Bura model corresponds well to experimental data, showing type II isotherms and estimating a homogeneous layer of 0.05 gH₂O/g dry matter. Scientists are engaged in processing the black soldier fly larvae (*H. illucens*) and meal worm larvae (*T. molitor*) into meal [35]. The purpose of the study was to study the technical and functional characteristic of the meal for the feed industry. Processing the meal worm larvae (*T. molitor*) and black soldier fly larvae (*H. illucens*) affected the composition, appearance, microbiological property, and the technical-functional and protein properties of the selected insect products. It was found that the direct processing of frozen or dried larvae into meal was not feasible because of the thermally induced melting of the fat content during grinding. The results of this study show that the parameters of processing the studied insects are similar to those of processing vegetable proteins that allows the use of traditional methods of processing protein. Also to ensure microbiological safety, a combination of several physical separation methods or the use of different ways

of thermal processing may be more suitable for producing protein-rich intermediate products.

Most insects are rich in irreplaceable amino acids, for example, the authors in works compared the protein content of the larva and pupa cuticles of the meal worm (*Tenebrio molitor*) [36–38]. A complete amino acid sequence has been determined for one of the pupa cuticle proteins. According to the partial amino acid sequences and the mass-spectrometric peptide card for the corresponding larval cuticular protein, it was concluded that the larval protein has the same amino acid sequence as the pupa protein. The sequence is characterized by a high content of alanine, proline, valine and tyrosine and a complete absence of acidic amino acid residues, sulfur-containing amino acids and tryptophan.

Besides to foreign experience of the use of insects for feeding, there are also researches by domestic scientists. A team of scientists from the Agrarian Scientific Center conducted a review and analysis of technologies for extruding feed and food products with the addition of insect biomass [39]. In the course of this work, there were found general regularities of extrusion process, influence of components on the appearance of products, and technological properties. The paper indicates the prospect of scientific research on the use of various insects as a feed additive for Aquacultures. Other researchers describes the positive effects of the microwave processing of dried biomass of black soldier fly larvae before removing fat mechanically (squeezing) [40–42]. The results of the study showed a decrease in pressure in the press chamber after the microwave processing from 6 to 4.5 MPa. In addition,

³ Official Website of LLC EcoBelok. Available at: <https://hermetia.ru/kontakty/> (accessed 12.11.2022). (In Russ.) ; Official Website of Buhler. Available at: <https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/ru/industries/insect-technology.html> (accessed 12.11.2022). (In Russ.)

microwave heating does not affect such an important fat indicator as the acid number. The use of microwave heating can be used not only for fat pressing, but also for pre-drying.

Scientists from Wuhan University of Technology conducted the research into the effect of convective and microwave drying methods on the nutritional value of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) [43]. The pre-prepared frozen larvae were thawed and divided into two parts. One part was dried at 60°C in a drying oven (WGL-230B, TAISITE, Tianjin, China) to constant weight, and the other part was dried in a microwave oven (M1-211A, Midea, Guangdong, China) at 500 W for 15 minutes. Then both samples were crushed. The dried insect meal was kept at 4°C in a refrigerator and analyzed. At the same time, the drying results were presented in the form of curves divided into 3 stages, namely, that the first stage of the decomposition process was relevant with the loss of free and weakly bound water up to 150°C. The second stage of decomposition at the temperature of 150–450°C, and at this stages proteins and carbohydrates volatilized. And the third stage at the temperature of 450–550°C can be associated with the polypeptide degradation. The overall conclusion obtained during the study showed that the microwave drying did affect the amino acid composition. As a result, the proteins of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) obtained by the conventional drying (60°C) have a higher amino acid content and better digestibility that can have a positive effect when added to compound feed.

The influence of the method of preprocessing and drying on the physicochemical properties of meal worm larvae (*Tenebrio molitor L.*) was carried out in Germany by B. Purschke [36]. The physicochemical properties of the dried larvae have been found to be highly dependent

on method of the preprocessing used. In addition to color and size, bulk material properties such as bulk density and hardness had a significant influence, resulting in different grinding behavior.

A study dealt with the influence of the convective drying and freeze drying as a mean of ensuring long-term storage [37]. Drying of whole larvae was carried out using preprocessing, and the positive effect of preprocessing (piercing, blanching and scalding in boiling water) was proven. The time was reduced by up to 6 times when using the convective drying. It is worth noting that the study considered only the microbiological safety of the products without affecting its chemical composition.

It should be noted that preprocessing of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) before the drying process does not always have a positive effect, as evidenced by R. Bogusz's study [38]. Preprocessing with a pulsed electric field did not affect the water-binding properties of the dried insect biomass, regardless of the type of drying. Also, during the infrared drying during preprocessing, the optical properties of the biomass did not change compared to the unprocessed raw materials.

The use of insects as an alternative protein source for feed is growing exponentially. Drying is a main technological process for further processing of insect biomass. The convective drying (with hot air) is one of the most time-consuming and energy-consuming, so it is necessary to look for alternative methods, which will meet the quality of the finished product and energy consumption, and will allow improving the process kinetics.

Materials and Methods

The research was carried out in DSTU, at the department "Techniques and Technologies of Food Productions". The object of the study is the muscle part

of the black soldier fly larvae. The subject is the thermal-physical regularities of the drying process of the materials under study.

The material for the study was grown at the experimental area of the DSTU and was used as a test material as shown in Figure 1. The black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) were grown on food waste (cabbage leaves, bran). Previously, the material was divided into chitin (shell) and muscle part (insides) using laboratory roller machines, then the muscle part (insides) were dried by the thermoradiation method (infrared drying) at a temperature of 100°C. For the convenience of the study, the dried material was ground in a laboratory mill (HM 310 ERKAYA) shown in Figure 2.



Fig. 1. The black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)



Fig. 2. Dried muscle part of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)

The object of the study is the black soldier fly larvae, a species of Diptera of the family Stratiomyidae. The homeland of this species is South America, and in our regions it is grown only under certain conditions (air temperature +32°C, and air humidity of at least 80%), the fly itself is not very mobile, which makes it easier to keep, the mouthparts is weakly expressed and has a licking type. The growth and development of larvae from laying eggs to full maturation (the larva is ready for processing) takes 32 days, while the larva grows from 19 to 27 mm per day, depending on the substrate it was grown, the nutritional value (proteins and fats) also depends on this.

The biomass of the black soldier fly larvae includes 8 replaceable and 10 indispensable amino acids [39–41]. Most amino acids are degraded (denatured) when exposed to high temperatures. For example, collagen consisting of arginine, lysine, proline, etc., begins to break down at 65°C, but at the same time, its reactivity increases and accordingly increases digestibility. When heated to 100°C, the aromatic molecules are separated from the protein part and partially destroyed, while prolonged heating over 100°C hydrolyzes the muscle proteins, which eventually breaks down to low-molecular nitrogen compounds. There is a theory that at close to the isoelectric point the protein is denatured at low temperatures and accompanied by maximum destruction of protein molecules, but the displacement of the pH medium can increase the thermal stability of proteins [42–44]. Earlier, during the processing, namely the drying of the examined material, the similar technologies used temperatures above 100°C that does not allow speaking about the preservation of protein [45–47]. However, under the influence of temperature regimes from 60 to 100°C, it is possible to achieve maximum safety of amino acids and non-ignition

of fat and exipients, which are in the raw material (biomass of black soldier fly larvae) in large quantities [46; 48; 49].

In addition to the influence of temperature drying modes, the other important indicators are structural (mechanical) and thermophysical properties of the material, such as thermal conductivity, heat capacity, viscosity, thickness of the layer, and moisture-holding capacity of the material influence. Calculation formulas for each indicator were used to determine the thermal and physical properties of the material. Due to the fact that the fat content directly affects the drying rate and is an integral part of such parameters as heat capacity and critical humidity, this parameter must be determined as the initial characteristic of the raw material.

The specific heat capacity depends on moisture and the amount of fat. The specific heat capacity influences the temperature of the drying agent. The parameter is calculated by formula (1) [50]:

$$c = 0.1 \cdot 10^{-3} \left[(100 - W) \times \right. \\ \left. \times (0.16M_c + 0.049 + 32.2) + 100W \right], \quad (1)$$

c – specific heat, kcal/kg·°C; W – raw material moisture, attributed to the weight of moisture in the raw material, %; M_c – oil content of raw material on absolutely dry substance, %; θ – raw material temperature, °C.

The humidity of the examined material was determined by a standard technique adapted to the raw material. The humidity of the biomass is determined by the adapted arbitration method according to GOST 13496.3-92. The weighting cup prepared for the study was placed in the drying cabinet for pretreatment 103°C within 30 minutes. The sample was weighed to within 1 mg. Then the samples with the analyzed mass are sent into the drying cabinet, preheated to 103°C, presented in Figure 3.



Fig. 3. Drying cabinet HORIZONT SPT-200

The drying process lasts 4 hours. The weighting cups with dried biomass are removed and cooled to room temperature, then weighed samples. Dried sample, shown in Figure 4.



Fig. 4. Dried sample of larvae

The moisture mass fraction is determined by formula (2):

$$W_1 = [m_1 - (m_3 - m_2)] \cdot \frac{100}{m_1}, \quad (2)$$

where m_1 – weight bottle, g; m_2 – weight bottle, lid, g; m_3 – weight bottle, lid and the dried test sample, g.

The oil content of the raw material is determined by the Soxhlet method. The device is mounted on the round-bottomed bulb 1, which already contains the extracting solvent (hexane was used in the study), then the refrigerator is installed 3. In the center of the extractor 4, there is placed a cardboard case (cartridge) 2, in which there is 5 g of the sample between two layers of cotton wool (Fig. 5). Hexane is brought to a boiling point and, in the course of the evaporation, enters the siphon by passing through the side outlet. When the solvent fills the cavity, the substance is extracted. When hexane reaches the upper level in the siphon, it is devastated: hexane drains into the bottom round sample and the cycle repeats. The extraction time is eight hours. Next, we place the round flask with the remaining fat on the bottom in a preheated up to 105 degrees for 1 hour. After drying the flask is placed in the desiccator and then weighed. Subsequent weighing is carried out after re-drying for 30 minutes. Drying and weighing shall be repeated until the difference between the two consecutive weighings is no more than 0.001 g.

Mass fraction of raw fat X , %, is calculated by formula (3):

$$X = \frac{m_2 - m_1 \cdot 100}{m}, \quad (3)$$

where m_2 – mass of flask with raw fat, g; m_1 – mass of empty flask, g; 100 – percentage conversion factor; m – sample mass, g.

Hygroscopic properties of both food and feed depend on their structure, composition, and on the temperature and humidity of the environment. The method

for determining the hygroscopicity of a substance is based on the determination of the mass difference after experimental storage in a desiccator within 24 hours. The increase in mass of the test substance in percentage X by formula (4) shall be calculated:

$$X = \frac{m_3 - m_2}{m_2 - m_1} \cdot 100, \quad (4)$$

where m_1 – the mass of an empty glass bottle, g; m_2 – the mass of the glass bottle with the test specimen prior to exposure in a moist environment, g; m_3 – the mass of the glass bottle with the test specimen after exposure in a moist environment, g.

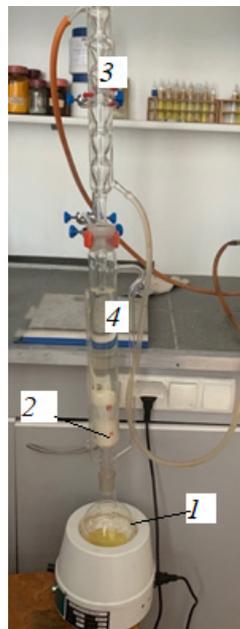


Fig. 5. Soxhlet apparatus: 1 – round-bottomed flask, 2 – cartridge, 3 – refrigerator, 4 – extractor

Critical humidity is determined by analogy with the moisture content of oily vegetable raw material. The critical moisture value of the oily raw material can be calculated using formula (5):

$$W = 14.5 \cdot \left(\frac{100 - M}{100} \right), \quad (5)$$

where 14.5 – dimensionless coefficient; M – amount of fat in the sample, %.

Thermal conductivity. The higher the humidity, the greater the thermal conductivity is. The thermal conductivity of the liquid fraction biomass is expected to be high due to the moisture content and low air content⁴ [32; 51]. For this purpose, we calculate the coefficient according to the formula (6):

$$\lambda = 0.8 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{100w}{100 - w} + 125 \right) \times \left(\frac{\vartheta \cdot \rho}{273} + \rho + 225 \right), \quad (6)$$

ρ – bulk mass or density, kg/m^3 ; w – raw material moisture, attributed to the weight of moisture in the raw material, %; ϑ – raw material temperature (20°C), $^\circ\text{C}$.

The thermal conductivity coefficient determines inertial properties of both a layer and single structural oily molecules. The higher the coefficient, the faster are the heating processes during drying⁵ [52–55]. Formula (7) determines this parameter:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (7)$$

ρ – bulk mass or density, kg/m^3 ; w – thermal conductivity calculated by formula (6); c – specific heat capacity calculated according to formula (1).

Bulk density ρ_0 depends on the type, dimension and humidity. When determining this characteristic, humidity, raw material dimensions and geometric dimensions of the measuring container should be specified.

Laboratory equipment used in the study:

- laboratory analytical scales LV 210-A of the 2nd class of accuracy, error not more than 0.0001 g;
- measuring cylinder, volume 0.0001 m^3 ;
- metal ruler;
- screen with cell width 1, 2, 5 mm;
- standard truncated cone funnel.

Prior to testing, a pre-weighed measuring cylinder should be installed under the tube. The distance between the upper edge of the cylinder and the valve shall be 50 mm (Fig. 6). The material must be pre-dried and weighed.

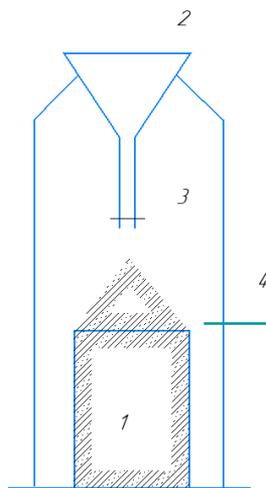


Fig. 6. Flow chart of bulk density instrument: 1 – measuring cylinder; 2 – truncated cone funnel; 3 – valve; 4 – material equalisation location

⁴ Baykov V.I., Pavlyukevich N.V. [Thermophysics. In 2 vols. Vol. 1. Thermodynamics, Statistical Physics, Physical Kinetics]. Minsk; 2013. 400 p. (In Russ.); Serdyuk V.A., Maltseva T.A., Tupolskikh T.I. [Investigation of the Physico-Chemical Properties of the Lipid Fraction of the Biomass of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia Illucens*)]. In: Innovative Technologies in Science and Education (ITNO-2019): Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. S. Divnomorskoe: DSTU; 2019. p. 141–145. (In Russ.); Maltseva T.A., Serdyuk V.A. [Analysis of the Main Factors Affecting the Completeness of Fat Extraction from Pressed Raw Materials]. In: Innovative Technologies in Science and Education (ITNO-2019): Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. S. Divnomorskoe: DSTU; 2019. p. 255–259. (In Russ.)

⁵ Sergeev A.G. [Guidelines for the Technology of Obtaining and Processing Vegetable Oils and Fats]. Vol. 1. Book 1. 2nd ed. L.: VNIIZH; 1975. 382 p. (In Russ.)

The dry material is poured into the funnel, then the valve is opened, the cylinder is filled with excess, the bolt is closed and the excess material is cut off from the middle to both sides with a metal ruler on a level with the cylinder edges. The material may not be compacted (Fig. 7–9). The cylinder with the material is then weighed within to 1 g. The tests are carried out in 3 repeats.



Fig. 7. Weighing of the test sample



Fig. 8. Levelling for better installation



Fig. 9. Biomass in a dimensional cylinder

Bulk density is defined as the ratio of the mass of a product to the volume of a dimensional container, according to the formula (8):

$$\rho_0 = \frac{m - m_{con}}{V}, \tag{8}$$

where m – mass of material tested and measuring capacity; m_{con} – tara mass; V – dimensional capacity.

The arithmetic mean of the results of 3 parallel definitions is taken as the test result.

Statistical analysis

All experiments were repeated three times and each used a new batch of larval samples for independent testing. Experimental results were expressed as mean \pm standard deviation. The data from all replicates were analyzed using the statistical program Statistica 10.0 followed by one-way analysis of variance with a significance level of 0.05.

Results

Thermal properties of both food and feed products were assessed in the section Materials and Methods, the results of the obtained studies were summarized in table for ease of presentation.

Table

Research results

Indicator	Value	Unit of measure
Raw material moisture	45	%
Critical humidity	9.5	%
Thermal conductivity coefficient	0.00055	m ² /s
Coefficient of thermal conductivity	0.144	W/(m·K)
Hygroscopic	7.14	%
Specific heat	0.429	kcal/kg°C
Raw fat content	51.45	%
Bulk density	605	kg/m ³
Specific volume	1.652	cm ³ /g

Knowing the regularity of heat and moisture movement, it is possible to draw conclusions about the appropriateness of the use of infrared drying method, and the amount of energy spent for the drying process. These properties determine the parameters and modes of the drying process and the design of the working body.

The coefficient of thermal conductivity determines how much heat passes through the unit of the surface area of the raw material into a unit of time at a temperature gradient equal to one. This indicator influences the correctness of the location of the working body (IR emitter) when forming the direction of heat flow.

The thermal conductivity of water is 0.555 W/(m·K) for food and feed products from 0.25 to 0.40 W/(m·K), and the muscle mass of black soldier fly larvae is 0.144, which is lower than that of conventional feed components. The humidity of the material has a significant influence on the thermal conductivity of the entire raw material, so at high humidity the investigated raw material has a humidity of 45% and above, the thermal conductivity remains linear and practically does not increase⁶ [53; 54]. However, if we consider the specific heat capacity of the dried material, we observe an inverse pattern, the higher the humidity, the higher the coefficient of thermal conductivity, as confirmed also by studies⁷ [57]. In accordance with the universal physical principle by Le Chateller-Brown, the stronger the external influence on the treatment object at the initial moment, the more intense are the internal processes that seek to return the system to a state of equilibrium. The obtained coefficients are theoretically calculated. Further experimental studies are needed to fully confirm the hypothesis.

Discussion and Conclusion

The study conducted to determine the heat-physical characteristics of the muscle mass of the black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) showed that the processes associated with heat processing are typical non-stationary and irreversible ones, for which the principles of thermodynamics of irreversible processes and first of all the principle of linearity are applicable. The increasing of the driving forces of the process has certain technological limits

⁶ Kasyanov G.I., Semenov G.V., Gritskikh V.A., et al. [Technologies of Food Production. Drying of Raw Materials: A Textbook for Universities]. 3rd ed. Moscow: Yurayt Publishing House; 2019. 116 p. (In Russ.); Mikhaliyev M.F., Treyakov N.P., Milchenko A.I., Zobnin V.V. [Calculation and Design of Machines and Apparatuses of Chemical Production]. L.: Mechanical Engineering, Leningrad Department; 1984. 301 p. (In Russ.)

⁷ Gordienko M.G. [Drying of Multicomponent Chemical, Pharmaceutical and Biological Materials]. Dr.Sci dissertation. Ivanovo; 2019. (In Russ.); Natareev O.S. [Modeling and Calculation of the Drying Process of Wet Materials in a Chamber Dryer]. Cand.Sci dissertation. Ivanovo; 2016. (In Russ.); Shevtsov S.A. [Scientific Support of Energy-Saving Processes of Drying and Heat-Moisture Treatment of Food Vegetable Raw Materials with Variable Heat Supply]. Dr.Sci dissertation. 2015. 587 p. (In Russ.)

(maximum permissible gradients of temperature, moisture content, pressure, etc.), while in increasing the kinetic coefficients (which include the above thermal and mass exchange characteristics) there are significant reserves. The results of the study are recommended to be used in the development of a mathematical model for

drying of the highly wet oily raw material, which is the muscle mass of the black soldier fly larvae⁸ [57–63].

In view of the diversity of literary sources, such studies were not found, which determines the relevance of the studies. However, the results of the experiment require further research.

REFERENCES

1. Gao Y., Zhao Y.-J., Xu M.-L., Shi S.-S. Soybean Hawkmoth (*Clanis Bilineata* Tsingtauca) as Food Ingredients: a Review. *CyTA – Journal of Food*. 2021;19(1):341–348. doi: <https://doi.org/10.1080/1947637.2021.1903082>
2. Do Carmo C.S., Costa L., Serra A.T., et al. Chapter 4 – Alternative Protein Sources. In: Galanakis C.M. (ed.). *Food Technology Disruptions*. Academic Press; 2021. p. 131–174. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821470-1.00010-0>
3. Ordoñez-Araque R., Egas-Montenegro E. Edible Insects: a Food Alternative for the Sustainable Development of the Planet. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2021;23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100304>
4. Alemu M.H., Olsen S.B., Vedel S.E., et al. Combining Product Attributes with Recommendation and Shopping Location Attributes to Assess Consumer Preferences for Insect-Based Food Products. *Food Quality and Preference*. 2017;55:45–57. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.08.009>
5. Karthick Raja P., Aanand S., Stephen Sampathkumar J., Padmavathy P. Silkworm Pupae Meal as Alternative Source of Protein in Fish Feed. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 2019;7(4):78–85. Available at: <https://www.entomoljournal.com/archives/2019/vol7issue4/PartB/7-3-228-911.pdf> (accessed 12.11.2022).
6. Kaushik S.J., Hemre G.-I. 12 – Plant Proteins as Alternative Sources for Fish Feed and Farmed Fish Quality. In: Lie Ø. (ed.). In Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Improving Farmed Fish Quality and Safety. Woodhead Publishing; 2008. p. 300–327. <https://doi.org/10.1533/9781845694920.2.300>
7. Pham H.D., Siddik M.A.B., Fotedar R., et al. Substituting Fishmeal with Lupin *Lupinus Angustifolius* Kernel Meal in the Diets of *Cobia* *Rachycentron Canadum*: Effects on Growth Performance, Nutrient Utilization, Haemato-Physiological Response, and Intestinal Health. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;267. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114556>
8. Abbasi S.A., Nayeem-Shah M., Abbasi T. Vermicomposting of Phytomass: Limitations of the Past Approaches and the Emerging Directions. *Journal of Cleaner Production*. 2015;93:103–114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.024>
9. Gasco L., Acuti G., Bani P., et al. Insect and Fish by-Products as Sustainable Alternatives to Conventional Animal Proteins in Animal Nutrition. *Italian Journal of Animal Science*. 2020;19(1):1360–1372. doi: <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1743209>
10. Hodar A.R., Vasava R.J., Mahavadiya D.R. Joshi N.H. Fish Meal and Fish Oil Replacement for Aqua Feed Formulation by Using Alternative Sources: a Review. *Journal of Experimental Zoology*. 2020;23(1):13–21. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20203130877> (accessed 12.11.2022).
11. Gasco L., Biancarosa I., Liland N.S. From Waste to Feed: a Review of Recent Knowledge on Insects as Producers of Protein and Fat for Animal Feeds. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2020;23:67–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.03.003>

⁸ Luzin P.S. [Improving the Technology of Drying Hawthorn Fruits in a Drum Dryer with a Paddle Mixing Device]. Cand.Sci dissertation. Michurinsk; 2019. 162 p. (In Russ.)

12. Gasco L., Biasato I., Dabbou S., et al. Animals Fed Insect-Based Diets: State-of-the-Art on Digestibility. *Performance and Product Quality. Animals*. 2019;9(4). doi: <https://doi.org/10.3390/ani9040170>
13. Lock E.J., Biancarosa I., Gasco L. Insects as Raw Materials in Compound Feed for Aquaculture. In: Halloran A., Flore R., Vantomme P., Roos N. (eds). *Edible Insects in Sustainable Food Systems*. Cham: Springer; 2018. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9_16
14. Nekrasov R.V., Chabaev M.G., Zelenchenkova A.A., et al. Nutritional Properties of *Hermetia Illucens* L. Larvas – A New Forage Product for Young Pigs (*Sus Scrofa Domestica* Erxleben). *Agricultural Biology*. 2019;54(2):316–325. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.2.316rus>
15. Van Huis A. Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security. *Annual Review of Entomology*. 2013;58:563–583. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153704>
16. Barragan-Fonseca K.B., Dicke M., van Loon J.J.A. Nutritional Value of the Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens* L.) and Its Suitability as Animal Feed – A Review. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2017;3(2):105–120. doi: <https://doi.org/10.3920/jiff2016.0055>
17. Niu Y., Zheng D., Yao B., et al. A Novel Bioconversion for Value-Added Products from Food Waste Using *Musca Domestica*. *Waste Management*. 2017;61:455–460. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.054>
18. Kurkembayeva B.M., Fedorovykh Yu.V., Ponomarev S.V., Ushakova N.A. New Feed Protein Products as Substitutes for Fishmeal in the Composition of Complete Feed for Tilapia When Its Farming in RAS. In: Innovative Solutions to Improve the Efficiency of Aquaculture. Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference. 2019. p. 194–197. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37418435> (accessed 12.11.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Ushakova N.A., Ponomarev S.V., Fedorovykh Yu.V., et al. Physiological Bases of the Nutritional Value of the *Hermetia Illucens* Larrow Concentrate in the Fish Diet. In: Ushakova N.A., Ponomarev S.V., Fedorovykh Yu.V., et al. (eds). Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological series. Vol. 3. 2020. p. 293–300. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S0002332920030108>
20. Koutsos L., McComb A., Finke M. Insect Composition and Uses in Animal Feeding Applications: A Brief Review. *Annals of the Entomological Society of America*. 2019;112(6):544–551. doi: <https://doi.org/10.1093/aesa/saz033>
21. Oteri M., Di Rosa A.R., Lo Presti V., et al. Black Soldier Fly Larvae Meal as Alternative to Fish Meal for Aquaculture Feed. *Sustainability*. 2021;13. doi: <https://doi.org/10.3390/su13105447>
22. Rudoy D.V., Pakhomov V.I., Maltseva T.A., Olshevskaya A.V. Analysis of the Effect of Microwave Processing of Dried Biomass of *Hermetia Illucens* Insects on the Process of Fat Extraction. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2021;74:321–333. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-174-024>
23. Yakovlev D.A., Vifyantseva T.A., Rudoy D.V., et al. [Analysis of Technological Properties of Dried Fractions of the Larva of the Black Lion (*Hermetia Illucens*)]. *State and Prospects of Development of the Agro-Industrial Complex*. 2019; p.125–128. (In Russ.)
24. Ayieko M.A., Ogola H.J., Ayieko I.A. Introducing Rearing Crickets (Gryllids) at Household Levels: Adoption, Processing and Nutritional Values. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2016;2(3):203–211. doi: <https://doi.org/10.3920/JIFF2015.0080>
25. Manceron S., Ben-Ari T., Dumas P. Feeding Proteins to Livestock: Global Land Use and Food Vs. Feed. *OCL*. 2014;21(4). doi: <https://doi.org/10.1051/ocl/2014020>
26. Shirko S.S., Pani A., Mujumdar A.S. Role of Expert Reviews for Assessment of Current Developments in Global Drying R&D. *Drying Technology*. 2022;40(2):227–229. doi: <https://doi.org/10.1080/0737937.2022.2018822>
27. Barragan-Fonseca K.B., Dicke M., van Loon J.J.A. Nutritional Value of the Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens* L.) and Its Suitability as Animal Feed – A Review. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2017;3(2):105–120. doi: <https://doi.org/10.3920/jiff2016.0055>
28. Ushakova N.A., Bastrakov A.I., Pavlov D.S., et al. Physiological Basis of the Nutritional Value of a Concentrate of *Hermetia Illucens* Larvae in Fish Diets. *Biology Bulletin*. 2020;47(3):276–282. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S0002332920030108>
29. Schiavone A., Dabbou S., De Marco M., et al. Black Soldier Fly Larva Fat Inclusion in Finisher Broiler Chicken Diet as an Alternative Fat Source. *Animal*. 2018;12(10):2032–2039. doi: <https://doi.org/10.1017/S1751731117003743>

30. Fombong F.T., Van Der Borgh M., Broeck J.V. Influence of Freeze-Drying and Oven-Drying Post Blanching on the Nutrient Composition of the Edible Insect *Ruspolia differens*. *Insects*. 2017;8(3). doi: <https://doi.org/10.3390/insects8030102>
31. Eswaran U.G.M., Karunanithi S., Gupta R.K., et al. Edible Insects as Emerging Food Products—Processing and Product Development Perspective. *Journal of Food Science and Technology*. 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05489-y>
32. Arru B., Furesi R., Gasco L., et al. The Introduction of Insect Meal into Fish Diet: The First Economic Analysis on European Sea Bass Farming. *Sustainability*. 2019;11(6). doi: <https://doi.org/10.3390/su11061697>
33. Albrektsen S., Kortet R., Skov P.V., et al. Future Feed Resources in Sustainable Salmonid Production: A Review. *Rev Aquac*. 2022;4(4):1790–1812. doi: <https://doi.org/10.1111/raq.12673>
34. Azzollini D., Derossi A., Severini C. Understanding the Drying Kinetic and Hygroscopic Behaviour of Larvae of Yellow Mealworm (*Tenebrio Molitor*) and the Effects on Their Quality. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2016;2(4):233–243. doi: <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0001>
35. Huang C., Feng W., Xiong J., et al. Impact of Drying Method on the Nutritional Value of the Edible Insect Protein from Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens* L.) Larvae: Amino Acid Composition, Nutritional Value Evaluation, in Vitro Digestibility, and Thermal Properties. *European Food Research and Technology*. 2019;245:11–21. doi: <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3136-y>
36. Purschke B., Brüggem H., Scheibelberger R., Jäger H. Effect of Pre-Treatment and Drying Method on Physico-Chemical Properties and Dry Fractionation Behaviour of Mealworm Larvae (*Tenebrio Molitor* L.). *European Food Research and Technology*. 2018;244:269–280. doi: <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2953-8>
37. Saucier L., M'ballou C., Ratti C., et al. Comparison of Black Soldier Fly Larvae Pre-Treatments and Drying Techniques on the Microbial Load and Physico-Chemical Characteristics. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2022;8(1)45–64. doi: <https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0002>
38. Bogusz R., Smetana S., Wiktor A., et al. The Selected Quality Aspects of Infrared-Dried Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens*) and Yellow Mealworm (*Tenebrio Molitor*) Larvae Pre-Treated by Pulsed Electric Field. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022;80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103085>
39. Liu X., Chen X., Wang H., et al. Dynamic Changes of Nutrient Composition throughout the Entire Life Cycle of Black Soldier Fly. *PLOS ONE*. 2017;12(8). doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182601>
40. Cheng V., Shoveller A.K., Huber L.-A., et al. Comparative Protein Quality in Black Soldier Fly Larvae Meal Vs. Soybean Meal and Fish Meal Using Classical Protein Efficiency Ratio (PER) Chick Growth Assay Model. *Poultry Science*. 2023;102(1). doi: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102255>
41. Schiavone A., De Marco M., Martínez S., et al. Nutritional Value of a Partially Defatted and a Highly Defatted Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia Illucens* L.) Meal for Broiler Chickens: Apparent Nutrient Digestibility, Apparent Metabolizable Energy and Apparent Ileal Amino Acid Digestibility. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2017;8(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0181-5>
42. Schiavone A., Dabbou S., De Marco M., et al. Black Soldier Fly Larva Fat Inclusion in Finisher Broiler Chicken Diet as an Alternative Fat Source. *Animal*. 2018;12(10):2032–2039. doi: <https://doi.org/10.1017/S1751731117003743>
43. Kim S.W., Less J.F., Wang L., et al. Meeting Global Feed Protein Demand: Challenge, Opportunity, and Strategy. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2019;7(1):221–223. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-030117-014838>
44. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., et al. Extrusion Technologies of Feed and Food Including Biomass of Insects (Review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(3):233–244. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.3.233-244>
45. Rudoy D.V., Pakhomov V.I., Maltseva T.A., Olshevskaya A.V. Analysis of the Influence of Microwave Processing of Dried Biomass of *Hermetia Illucens* Insects on the Process of Fat Pressing. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2021;(10). (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-174-024>
46. Maltseva T.A. Research of the Properties of Dried *Hermetia Illucens* Fly Larvae and Fat in Relation to the Extraction Process. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2021;(173):281–291. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-173-021>

47. Maltseva T., Olshevskaya A. Investigation of the Influence of the Properties of the Pressed Material on the Energy Consumption and Design Parameters of the Oil Press. *IOP conference Series: Earth and Environmental Science (EES)*. 2021;937. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032047>
48. Arnautov M.V., Baskakova Yu.A., Usikov T.N., Bindyukov S.V. The Nutritional Value of Domestic Feed Components and the Prospects of Their Inclusion in the Compound Feeds for Aquaculture. *Collection of Scientific Papers of KRCAHVM*. 2021;10(1):148–152. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.48612/mpkn-5vab-g5vn>
49. Salazar L.F.L., Nero L.A., Campos-Galvão M.E.M., et al. Effect of Selected Feed Additives to Improve Growth and Health of Dairy Calves. *PLoS ONE*. 2019;14(5). doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216066>
50. Popov I.V., Algburi A., Prazdnova E.V., et al. A Review of the Effects and Production of Spore-Forming Probiotics for Poultry. *Animal*. 2021;(11):941. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11071941>
51. Lee D.H., Chu K.-B., Kang H.-J., et al. Peptides in the Hemolymph of *Hermetia Illucens* Larvae Completely Inhibit the Growth of *Klebsiella Pneumonia* in Vitro and in Vivo. *Journal of Asia-Pacific Entomology*. 2020;23(1):36–43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.10.004>
52. Ooninx D.G.A.B., van Broekhoven S., van Huis A., van Loon J.J.A. Feed Conversion, Survival and Development, and Composition of Four Insect Species on Diets Composed of Food By-Products. *PLoS One*. 2018;10.
53. Hale O.M. Dried *Hermetia Illucens* Larvae (Stratiomyidae) as a Feed Additive for Poultry. *Journal of the Georgia Entomological Society*. 1973;8:16–20.
54. Kamau E., Mutungi C., Kinyuru J., et al. Moisture Adsorption Properties and Shelf-Life Estimation of Dried and Pulverised Edible House Cricket *Acheta Domesticus* (L.) and Black Soldier Fly Larvae *Hermetia Illucens* (L.). *Food Research International*. 2018;106:420–427. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.012>
55. Bußler S., Rumpold B.A., Jander E., et al. Recovery and Techno-Functionality of Flours and Proteins from Two Edible Insect Species: Meal Worm (*Tenebrio Molitor*) and Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens*). *Heliyon*. 2016;2. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00218>
56. Demin K.A., Refeld A.G., Bogdanova A.A., et al. Mechanisms of *Candida* Resistance to Antimicrobials and Promising Ways to Overcome It: The Role of Probiotics. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2021;13:926–948. doi: <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09776-6>
57. Caligiani A., Marseglia A., Leni G., et al. Composition of Black Soldier Fly Prepupae and Systematic Approaches for Extraction and Fractionation of Proteins, Lipids and Chitin. *Food Research International*. 2018;105:812–820. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.012>
58. Guiné R.P.F. The Drying of Foods and Its Effect on the Physical-Chemical, Sensorial and Nutritional Properties. *International Journal of Food Engineering*. 2018;4(2):93–100. doi: <https://doi.org/10.18178/ijfe.4.2.93-100>
59. Zavalij A.A., Lago L.A., Rybalko A.S. [Device for Infrared Drying of Agricultural Raw Materials at Low Pressure]. *Agrarian Bulletin of the Urals. Technical Sciences*. 2017;(6):42–49. (In Russ.)
60. Lao Y., Zhang M., Devahastin S., Ye Y. Effect of Combined Infrared Freeze Drying and Microwave Vacuum Drying on Quality of Kale Yoghurt Melts. 2020;38(5–6):621–633. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1658600>
61. Adam F. Drying Kinetics and Quality of Beetroots Dehydrated by Combination of Convective and Vacuum-Microwave Methods. *Journal of Food Engineering*. 2010;98(4):461–470.
62. Muliterno M.M., Rodrigues D., de Lima F. S., et al. Conversion/Degradation of Isoflavones and Color Alterations during the Drying of Okara. *LWT – Food Science and Technology*. 2017;(75):512–519.
63. Fakhreddin S. Recent Applications and Potential of Infrared Dryer Systems for Drying Various Agricultural Products: A Review. *International Journal of Fruit Science*. 2020;20(3):586–602.

Submitted 12.09.2022; approved after reviewing 18.10.2022; accepted for publication 25.10.2022
Поступила 12.09.2022; одобрена после рецензирования 18.10.2022; принята к публикации 25.10.2022

About the authors:

Valentina A. Doroshenko, 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

Igor A. Khozyaev, Professor 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/0000-0003-3821-2634>, igor.khozyaev@mail.ru

Dmitry A. Yakovlev, Associate Professor 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/0000-0001-8145-9128>, Researcher ID: H-6373-2017, yakovlev_d_a@mail.ru

Artyom A. Doroshenko, Associate Professor of the Chair of Design and Technical Service of Transport Technological Systems, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-7059>, Researcher ID: Q-3877-2016, sad133@yandex.ru

Alexey A. Shcherbakov, 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/0000-0001-6856-2219>, Researcher ID: GQI-3325-2022, qickmandt642@mail.ru

Contribution of the authors:

V. A. Doroshenko – writing and formatting the article, correcting the text.

I. A. Khozyaev – scientific guidance, finalization of the article.

D. A. Yakovlev – scientific guidance, finalization of the article.

A. A. Doroshenko – preparation of the article, calculation of thermophysical parameters.

A. A. Shcherbakov – conducting experimental research, finalization of the article.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Дорошенко 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

Хозяев Игорь Алексеевич, профессор 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/0000-0003-3821-2634>, igor.khozyaev@mail.ru

Яковлев Дмитрий Анатольевич, доцент 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/0000-0001-8145-9128>, Researcher ID: H-6373-2017, yakovlev_d_a@mail.ru

Дорошенко Артем Александрович, доцент кафедры проектирования и технического сервиса транспортно-технологических систем Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3739-7059>, Researcher ID: Q-3877-2016, sad133@yandex.ru

Щербаков Алексей Алексеевич, 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/0000-0001-6856-2219>, Researcher ID: GQI-3325-2022, qickmandt642@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

V. A. Дорошенко – написание, оформление статьи, корректировка текста.

I. A. Хозяев – научное руководство, доработка статьи.

D. A. Яковлев – научное руководство, доработка статьи.

A. A. Дорошенко – подготовка текста статьи, расчет теплофизических параметров.

A. A. Щербаков – проведение экспериментальных исследований, доработка 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 20.07.2022 г.):

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

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

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

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

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) 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 20 July 2022):

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and CrossCheck systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) 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. Карнов*
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 12.12.2022 г. Дата выхода в свет 30.12.2022 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 12,68.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 1135. 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 12.12.2022. Date of publishing 30.12.2022.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 12.68.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 1135. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)

Уважаемые читатели!

Вы можете приобрести выпуск журнала, оплатив в банке прилагаемую квитанцию. Для своевременной отправки номера пришлите копию платежного документа, ФИО и адрес получателя на e-mail vestnik_mrsu@mail.ru

		<i>Форма № ПД-4</i>	
Извещение	УФК по Республике Мордовия (ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» л/с 20096Х35120) КПП 132601001		
	(наименование получателя платежа)		
Кассир	1326043499	0321464300000010900	
	(ИНН получателя платежа)		(номер счета получателя платежа)
	40102810345370000076		
	корреспондентский счет		
	Отделение-НБ РЕСПУБЛИКА МОРДОВИЯ БАНКА РОССИИ//УФК по Республике Мордовия г. Саранск		БИК 018952501
	(наименование банка получателя платежа)		
	КБК 0000000000000000440		ОКТМО 89701000
	за реализацию журнала «Инженерные технологии и системы»		
	(наименование платежа)		(номер лицевого счета (код) плательщика)
	Ф.И.О. плательщика: _____		
Адрес плательщика: _____			
Сумма платежа: <u>500</u> руб. <u>00</u> коп. Сумма платы за услуги: _____ руб. _____ коп			
Итого _____ руб. _____ коп. “ _____ ” _____ 20 _____ г.			
С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____			
Квитанция Кассир	УФК по Республике Мордовия (ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» л/с 20096Х35120) КПП 132601001		
	(наименование получателя платежа)		
	1326043499	0321464300000010900	
	(ИНН получателя платежа)		(номер счета получателя платежа)
	40102810345370000076		
	корреспондентский счет		
	Отделение-НБ РЕСПУБЛИКА МОРДОВИЯ БАНКА РОССИИ//УФК по Республике Мордовия г. Саранск		БИК 018952501
	(наименование банка получателя платежа)		
	КБК 0000000000000000440		ОКТМО 89701000
	за реализацию журнала «Инженерные технологии и системы»		
(наименование платежа)		(номер лицевого счета (код) плательщика)	
Ф.И.О. плательщика: _____			
Адрес плательщика: _____			
Сумма платежа: <u>500</u> руб. <u>00</u> коп. Сумма платы за услуги: _____ руб. _____ коп.			
Итого _____ руб. _____ коп. “ _____ ” _____ 20 _____ г.			
С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____			

✂ - линия отреза