

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402

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

**Том 34, № 2. 2024**

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

**16+**



**Vol. 34, no. 2. 2024**

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Periodicity:  
Quarterly

# **ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS**

doi: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):  
**Вестник Мордовского университета**

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

The previous name until beginning of 2019:  
**Mordovia University Bulletin**

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

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

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),  
Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),  
Committee on Publication Ethics (COPE),

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),  
свидетельство ПИ № ФС77-74640 от 24.12.2018 г.

Подписной индекс – **70539**

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

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

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», 2024

## Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал является членом Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication Ethics (COPE), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef и международного сообщества рецензентов Publons

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



## Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

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

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



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Сенин Петр Васильевич** – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, руководитель Высшей школы развития научно-образовательного потенциала ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

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

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

**Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы** – доктор биологических наук, академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет» (Москва, Российская Федерация); профессор кафедры лесной индустрии Барынского государственного университета (Бартын, Турция)

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

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

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

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

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

**Жачкин Сергей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ORCID: 0000-0002-1844-5011 (Воронеж, Российская Федерация)

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## EDITORIAL BOARD

**Petr V. Senin** – *Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Higher School for Development of Scientific and Educational Potential of the National Research Mordovia State University, ORCID: 0000-0003-3400-7780, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)

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

**Svetlana V. Gordina** – *Executive Editor*, Cand.Sci. (Ped.), ORCID: 0000-0003-2265-418X, vestnik\_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

**Surkhay Allahverdiyev** – Dr.Sci. (Biol.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Chair of Ecology and Nature Management, Moscow Pedagogical State University (Moscow, Russian Federation); Head of the Forest Industry Chair, Bartin University (Bartın, Turkey)

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

**Alexey G. Bulgakov** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University (Kursk, Russian Federation); Professor of the Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, ORCID: 0000-0003-4261-9840 (Dresden, Germany)

**Daifen Chen** – Ph.D., Professor, Dean of the School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology; Director of the International Joint Laboratory of Ship Green Power and Emission Control of Jiangsu, ORCID: 0000-0002-4110-2199 (Zhenjiang, China)

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

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

**Liliya V. Fedulova** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of RAS, Head of the Experimental Clinic of the Laboratory of Bioactive Substances of Animal Origin, V. M. Gorbатов Federal Research Center of Food Systems, Russian Academy of Sciences, ORCID: 0000-0003-3573-930X (Moscow, Russian Federation)

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

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

**Natalia L. Istomina** – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of Physical Sciences Department, Russian Academy of Sciences, Deputy of Academic Secretary for Scientific and Organizational Work; Professor of the Innovation Management Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University); Editor-in-Chief, Photonics Russia, ORCID: 0000-0001-6008-1226 (Moscow, Russian Federation)

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

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

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



## ***СОДЕРЖАНИЕ***

### ***ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ***

<b>Плотников С. А., Гневашев П. В., Шишкин Г. П., Карташевич А. Н.</b> Зондирование составов альтернативных топлив с целью определения электрических параметров .....	178
<b>Припоров И. Е.</b> Моделирование приготовления комбикормов-концентратов при изменении состава машин и комбикормовых агрегатов .....	191

### ***АГРОИНЖЕНЕРИЯ***

<b>Божко И. В., Камбулов С. И., Пархоменко Г. Г., Рыков В. Б., Подлесный Д. С.</b> Обоснование оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора по тяговому сопротивлению .....	213
<b>Мударисов С. Г., Фархутдинов И. М., Багаутдинов Р. Ю.</b> Обоснование параметров комбинированного сошника в цифровом двойнике методом дискретных элементов .....	229
<b>Труфляк Е. В., Скоробогаченко И. С., Коновалов В. И.</b> Параметры и режимы работы гидравлической мини-сеялки мелкосемянных овощных культур .....	244

### ***ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ***

<b>Головин Д. Ю., Дивин А. Г., Самодуров А. А., Захаров Ю. А., Тюрин А. И., Головин Ю. И.</b> Идентификация дефектов изделий из сотовых композиционных материалов методом инфракрасной сканирующей термографии .....	265
<b>Беляков М. В., Московский М. Н., Ефременков И. Ю., Новиков В. С., Кузнецов С. М., Бойко А. А., Михайличенко С. М.</b> Оптические фотолюминесцентные свойства семян растений при заражении микопатогенами .....	281

### ***ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ***

<b>Шабаев Е. А., Романовец М. М.</b> Компьютерное моделирование цифровой системы автоматического регулирования освещенности .....	295
<b>Новикова Г. В., Тихонов А. А., Просвирякова М. В., Сторчевой В. Ф., Михайлова О. В., Сторчевой А. В.</b> Обоснование параметров СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных .....	318
<b>Информация для авторов и читателей</b> .....	336

## CONTENTS

### *TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT*

<b>Plotnikov S. A., Gnevashev P. V., Shishkin G. P., Kartashevich A. N.</b> Probing Alternative Fuel Compositions to Determine Electrical Parameters .....	178
<b>Priporov I. E.</b> Modeling of the Producing Concentrated Compound Feed when Changing the Compound Feed Machinery .....	191

### *AGRICULTURAL ENGINEERING*

<b>Bozhko I. V., Kambulov S. I., Parkhomenko G. G., Rykov V. B., Podlesny D. S.</b> Justification of Optimal Operating Parameters of the Field Cultivator Tool through Determining Traction Resistance .....	213
<b>Mударisov S. G., Farkhutdinov I. M., Bagautdinov R. Yu.</b> Justification of Dual-Level Opener Parameters in Digital Twin by the Discrete Element Method .....	229
<b>Truflyak E. V., Skorobogachenko I. S., Konovalov V. I.</b> Parameters and Modes of a Hydraulic Mini Seeder Operation for Small-Seeded Vegetable Crops .....	244

### *INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS*

<b>Golovin D. Yu., Divin A. G., Samodurov A. A., Zaharov Yu. A., Tyurin A. I., Golovin Yu. I.</b> Identification of Defects in Products Made from Honeycomb Composite Materials Using Infrared Scanning Thermography .....	265
<b>Belyakov M. V., Moskovskiy M. N., Efremenkov I. Yu., Novikov V. S., Kuznetsov S. M., Boyko A. A., Mikhaylichenko S. M.</b> Optical Photoluminescent Properties of Plant Seeds when Infected with Mycopathogens .....	281

### *ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT*

<b>Shabaev E. A., Romanovets M. M.</b> Computer Simulation of a Digital System of Automatic Lighting Control .....	295
<b>Novikova G. V., Tikhonov A. A., Prosviryakova M. V., Storchevoy V. F., Mikhaylova O. V., Storchevoy A. V.</b> Justification of the Microwave Unit Parameters for Removing Fat from the Bones of Meat-Producing Animals .....	318
<i>Information for Authors and Readers of the Journal</i> .....	336

# ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Оригинальная статья / Original article  
УДК 628.93:004.924

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402.178-190



## Зондирование составов альтернативных топлив с целью определения электрических параметров

С. А. Плотников<sup>1</sup>✉, П. В. Гневашев<sup>1</sup>, Г. П. Шишкин<sup>2</sup>,  
А. Н. Каргашевич<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Вятский государственный университет  
(г. Киров, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Кировский государственный медицинский университет  
(г. Киров, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Белорусская государственная сельскохозяйственная академия  
(г. Горки, Республика Беларусь)

✉ PlotnikovSA@bk.ru

### Аннотация

**Введение.** В данной статье внимание уделяется исследованию электрических параметров пятнадцати составов альтернативных топлив. Актуальной является задача разработки бесконтактных методов анализа состава топлива.

**Цель исследования.** Получение данных диэлектрической проницаемости альтернативных топлив для дальнейшего поиска связи с показателями процесса сгорания.

**Материалы и методы.** Для проведения исследования был использован конденсатор, состоящий из двух алюминиевых пластин размером 175x102 мм, а также мультиметр Sinometex ZT-Y.

**Результаты исследования.** При сравнении значений диэлектрической проницаемости представленных составов альтернативного топлива между минимальным и максимальным содержанием добавленного спирта и растительных масел в смесь обнаруживается зависимость. Она проявляется в характере значений диэлектрической проницаемости, которые коррелируют с емкостью конденсатора при наличии смеси между обкладками, и наблюдается для всех трех добавляемых в смесь углеводородов: этанола, рапсового и сурепного масел. Отмечается, что диэлектрическая проницаемость возрастает в диапазоне от 10 до 50 % добавленного этанола; рапсового и сурепного масел, достигая значений от  $\epsilon = 3,05$  до 45,31 для этанола, от  $\epsilon = 2,35$  до 2,72 для рапсового масла и от  $\epsilon = 2,33$  до 2,8 для сурепного масла.

**Обсуждение и заключение.** Анализ значений диэлектрической проницаемости различных составов альтернативных топлив показывает, что при увеличении содержания спирта и растительных масел в смеси от 10 до 50 % диэлектрическая проницаемость увеличивается. Это справедливо для всех трех углеводородов: этанола, рапсового и сурепного масел.

© Плотников С. А., Гневашев П. В., Шишкин Г. П., Каргашевич А. Н., 2024



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



**Ключевые слова:** альтернативное топливо, электрические параметры, диэлектрическая проницаемость, безмоторный метод, этанол, рапсовое масло, сурепное масло, дизельное топливо

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

**Для цитирования:** Зондирование составов альтернативных топлив с целью определения электрических параметров / С. А. Плотников [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 178–190. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.178-190>

## Probing Alternative Fuel Compositions to Determine Electrical Parameters

S. A. Plotnikov<sup>a</sup>✉, P. V. Gnevashev<sup>a</sup>, G. P. Shishkin<sup>b</sup>,  
A. N. Kartashevich<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

<sup>b</sup> Kirov State Medical University (Kirov, Russian Federation)

<sup>c</sup> Belarusian State Agricultural Academy  
(Gorki, Republic of Belarus)

✉ PlotnikovSA@bk.ru

### Abstract

**Introduction.** In this paper attention is paid to the study of electrical parameters of fifteen compositions of alternative fuels. The task of developing non-contact methods of fuel composition analysis is relevant.

**Aim of the Study.** The study is aimed at obtaining dielectric constant data of alternative fuels for further search of the relationship with combustion process.

**Materials and Methods.** For the study there was used a capacitor consisting of two 175x102 mm aluminum plates and a Sinometex ZT-Y multimeter.

**Results.** When comparing the dielectric constant values of all presented alternative fuel compositions, there is found the dependence between the minimum and maximum content of added alcohol and vegetable oils in the mixture. This dependence manifests itself in the nature of dielectric constant values correlating with the capacitor electric capacity, if there is the mixture between the plates. It is observed for all three hydrocarbons added to the mixture: ethanol, rapeseed and colza oils. For example, the dielectric permittivity increases throughout the range from 10 to 50% of the added ethanol, rapeseed and colza oils, reaching the values from  $\epsilon = 3.05$  to 45.31; from  $\epsilon = 2.35$  to 2.72; from  $\epsilon = 2.33$  up to 2.8, respectively.

**Discussion and Conclusion.** The analysis of the dielectric constant values of various alternative fuel compositions shows that when the content of alcohol and vegetable oils in the mixture increases from 10 to 50%, the dielectric constant increases. And this is true for all three hydrocarbons: ethanol, rapeseed and colza oils.

**Keywords:** alternative fuel, electrical parameters, permittivity, non-motorized method, ethanol, rapeseed oil, colza oil, diesel fuel

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

**Acknowledgments:** The authors would like to express their gratitude to the reviewers, whose critical evaluation of the presented materials and suggestions for their improvement contributed significantly to the quality of the article.

**For citation:** Plotnikov S.A., Gnevashev P.V., Shishkin G.P., Kartashevich A.N. Probing Alternative Fuel Compositions to Determine Electrical Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):178–190. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.178-190>

**Введение.** Получение точных данных о свойствах реальных веществ в любом состоянии<sup>1</sup> требует создания усложненных установок, что приводит к увеличению затрат и времени<sup>2</sup>. На сегодняшний день автотракторные двигатели имеют «трепетное» отношение к качеству топливовоздушной смеси, подаваемой в камеру сгорания<sup>3</sup>. От ее качества зависит эффективность работы двигателя, его мощность, расход топлива, количество вредных выбросов в атмосферу<sup>4</sup>. Неправильный состав смеси может привести к быстрому износу деталей двигателя, снижению его ресурса, ухудшению экологических показателей<sup>5</sup>. Соответственно, разработка современных бесконтактных методов, способных выявлять наличие как примесей, так и присадок в составе топливной смеси, является важной исследовательской задачей [1–3].

Научным коллективом кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета задано новое направление безмоторного исследования показателей процесса сгорания [4–6], а также направление по идентификации жидких альтернативных топлив (АТ) на основе электрических данных<sup>6</sup>.

Общей целью научных исследований является разработка безмоторных методов определения параметров рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на жидких топливах. В данной статье внимание преимущественно уделено исследованию электрических параметров пятнадцати составов альтернативных топлив.

**Обзор литературы.** Все чаще российские и зарубежные исследователи обращаются к изучению взаимосвязи электрических и физико-химических параметров углеводородных топлив. Так, учеными Казанского национального исследовательского технологического университета предложен простой рефрактоденсиметрический метод визуальной идентификации и установления групповой принадлежности индивидуальных органических веществ, а также оценки группового углеводородного состава светлых нефтепродуктов. Они доказали, что

<sup>1</sup> Лютко В., Луканин В. Н., Хачиян А. С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / Под ред. В. Лютко, В. Н. Луканина. М. : МАДИ, 2000. 311 с.

<sup>2</sup> Александров А. А., Архаров И. А. Моторные топлива. Современные аспекты безопасного хранения и реализации в городах-мегаполисах. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 352 с.

<sup>3</sup> Итинская Н. И., Кузнецов Н. А. Топлива, масла и технические жидкости : справочник. М. : Агропромиздат, 1989. 303 с.

<sup>4</sup> Николаев В. Ф., Кутушев И. Р., Хамедзянов А. К. Рефракто-магнитооптический метод оценки эксплуатационных и теплотехнических характеристик реактивных и дизельных топлив // Вестник Казанского технологического университета. 2003. № 2. С. 302–314. EDN: HUWHRB

<sup>5</sup> Никифоров А. Н. Научные основы использования топлива и смазочных материалов в сельском хозяйстве. М. : Агропромиздат, 1987. 248 с.

<sup>6</sup> Смольников М. В., Плотников С. А., Гневашев П. В. Результаты электрических измерений углеродосодержащих смесей с дизельным топливом // Будущее технической науки : мат-лы XXII Всерос. молод. науч.-техн. конф. Н. Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2023. С. 369–370.

групповой состав нефтепродуктов можно установить с помощью измерения удельной рефракции [7; 8].

Зарубежным научным сообществом проведены исследования по взаимосвязям физико-химических свойств топлив с цетановым числом [9] и процентному содержанию биодизеля в дизельном топливе [10]. На основе данных физико-химических свойств происходит мониторинг качества обработки полимерного сырья и улучшение технологических параметров процесса производства товарного топлива [11–13].

Г. Е. Дунаевский с соавторами исследовали зависимость диэлектрической проницаемости бензина с различным значением октанового числа от наличия и концентрации присадок и установили, что добавление присадок к автомобильному топливу в среднем ведет к увеличению значений диэлектрической проницаемости<sup>7</sup>.

Ученые Кубанского государственного технологического университета широко исследуют вопрос применения теории термодинамического подобия для обобщения справочных данных диэлектрической проницаемости парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов. Любое сравнение предполагает рассмотрение явлений в одинаковых условиях. При сопоставлении свойств веществ в качестве таких условий не могут быть приняты одинаковые параметры, так как, например, при одинаковых показателях температуры и давления различные вещества могут находиться в разных агрегатных состояниях. Согласно теории, физически подобными для всех веществ являются критические состояния, поэтому параметры вещества в критическом состоянии  $P_k$ ,  $T_k$ ,  $V_k$  принимают за основу сравнения термодинамических свойств газов и жидкостей. В работе ученых теория термодинамического подобия применялась к анализу зависимости диэлектрической проницаемости от температуры нескольких парафиновых, ароматических и нафтеновых углеводородов. Всего рассмотрено 15 веществ. Эти углеводороды интересны тем, что они входят в состав природных углеводородов (газ, нефть, газовый конденсат), которые являются ценнейшим сырьем для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Природные углеводороды при трении (в процессе заполнения хранилищ и перекачки с большой скоростью по трубам, а также фильтрации) легко электризуются, и на их поверхности могут образовываться и накапливаться заряды статического электричества, в связи с чем возможны взрывы и пожары.

Таким образом, изучение электрофизических свойств, одним из которых является диэлектрическая проницаемость, данных веществ и их составляющих вызывает как научный, так и практический интерес для ряда химических производств<sup>8</sup>. Несмотря на многочисленность публикаций по изучаемой проблематике, практически отсутствуют исследования по измерению диэлектрических свойств смесевых топлив. Авторы впервые показали, как изменяется диэлектрическая проницаемость топлив, основанных на смеси дизельного топлива, растительных масел и этанола.

<sup>7</sup> Диэлектрические свойства нефтепродуктов авиационной промышленности в области крайневысоких частот / Г. Е. Дунаевский [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : мат-лы докладов 25-ой Международ. Крымской конф. Т. 2 (6–12 сентября 2015 г., г. Севастополь). Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2015. С. 952–953. EDN: UPCAVJ

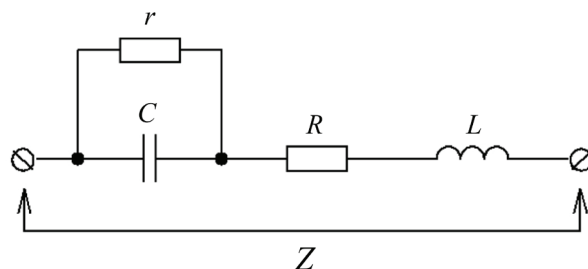
<sup>8</sup> Диэлектрические свойства автомобильного топлива с присадками в КВЧ диапазоне / Р. А. Кремзер [и др.] // Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019 : сб. тр. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. (1–4 октября 2019 г., г. Томск). Томск, 2019. С. 212–213.

**Материалы и методы.** Диэлектрик – материал, который способен запасать энергию при приложении внешнего электрического поля. Если источник постоянного напряжения включен параллельно обкладкам плоского конденсатора, то больше заряда накапливается, когда между обкладками помещен диэлектрик. В случае отсутствия материала (вакуума) между обкладками накапливается меньшее количество заряда (рис. 1).

В электромагнетизме принято абсолютную диэлектрическую проницаемость называть диэлектрической проницаемостью и обозначать ее греческой буквой  $\varepsilon$ , которая является мерой электрической поляризуемости диэлектрика. Ее можно вычислить следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{см}}}{C_{\text{возд}}}, \tag{1}$$

где  $C_{\text{см}}$  – емкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, nF;  $C_{\text{возд}}$  – емкость конденсатора по воздуху, nF.



Р и с. 1. Схема измерения электрических параметров АТ:  
 $Z$  – импеданс;  $C$  – собственно емкость;  $r$  – сопротивление через жидкость (определяет ток утечки);  
 $R$  – паразитное последовательное сопротивление;  $L$  – паразитная последовательная индуктивность

F i g. 1. Diagram of measurement of electrical parameters AT:  
 $Z$  – impedance;  $C$  – actual capacitance;  $r$  – resistance through the liquid (determines the leakage current);  
 $R$  – parasitic series resistance;  $L$  – parasitic series inductance

*Источник:* схема составлена авторами.  
*Source:* Figure was compiled by the authors.

Материал с высокой диэлектрической проницаемостью поляризуется в ответ на приложенное электрическое поле сильнее, чем материал с низкой диэлектрической проницаемостью. Тем самым он накапливает в материале больше энергии. В электростатике диэлектрическая проницаемость играет важную роль в определении емкости конденсатора. Диэлектрическая проницаемость среды – физическая величина, характеризующая свойства изолирующей среды и показывающая зависимость электрической индукции от напряженности электрического поля.

Лабораторные исследования проводились на кафедре органической химии Вятского государственного университета. Объектами для исследования являлись смеси из двух видов дизельного топлива (ДТ), в которых содержится до 50 % возобновляемого источника энергии (сурепного, рапсового масла и этанола). Количество исследуемых смесей топлив составляло 15 шт.

Предметом исследований являлось определение электрических параметров составов топлив. В конечном результате выявлялось значение диэлектрической проницаемости для всех составов. Для измерения электрических параметров применялся мультиметр Sinometex ZT-Y (рис. 2).



Р и с. 2. Мультиметр Sinometex ZT-Y. Автор изображения П. В. Гневашев, 2022 г.

F i g. 2. Sinometex ZT-Y Multimeter. Photo by P. V. Gnevashev, 2022

Рассмотрим одни из основных получаемых параметров мультиметра с их диапазонами измерений: измерение сопротивления равно от 0,01 Ома до 10 МОм; генератор прямоугольных импульсов равен от 50 Гц до 5 кГц; емкость равна от 1 пФ до 1000 мкФ; постоянный и переменный ток равен от 0,1 мкА до 10 А; постоянное напряжение равно от 0,1 мкВ до 1000 В.

**Результаты исследования.** Изменение значений показателей процесса сгорания топлива в камере сгорания дизеля обычно связывают с физико-химическими свойствами топлив. Следующим этапом исследований явилось изучение отношения углеводородного топлива к электрическому току и снятие параметров для всех 15 исследуемых АТ (табл. 1–3).

Результаты проведенных измерений указывают на то, что изменение процентного содержания этанола в составе этанола-топливной смеси (ЭТЭ) не влияет на омическое сопротивление конденсатора постоянному току (табл. 1). Однако увеличение массового содержания этанола с 10 до 50 % в составе эмульсии повышает электроемкость состава, применяемого в качестве диэлектрика конденсатора. Например, если емкость конденсатора при наличии смеси ДТ с содержанием этанола 10 % составляет  $C = 1,7$  нФ, добавление спирта 50 % в смесь дает емкость  $C = 16,3$  нФ. Резкий перепад в сторону увеличения значения емкости конденсатора происходит при достижении массового содержания этанола около 30 %. Это явление происходит из-за имеющегося свойства накопления электричества именно этанолом.

Полученные значения электрофизических величин обусловлены тем, что этанол, используемый в качестве добавляемого вещества, не содержит в своем составе солей и органических примесей, в связи с чем не меняет электрическое сопротивление ( $R = 1,3 \text{ МОм}$ ) полученной топливной смеси (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

**Электрические параметры топлив различного состава с добавлением до 50 % этанола в смеси**

**Electrical parameters of fuels of different composition with addition of up to 50% of ethanol in the mixture**

Состав топлива / Fuel composition	Емкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, $C$ , nF / Capacitance of the capacitor if there is the mixture between the plates, $C$ , nF
ДТ 90 % + Э 10 % / DF 90% + E 10%	1,7
ДТ 80 % + Э 20 % / DF 80% + E 20%	2,5
ДТ 70 % + Э 30 % / DF 70% + E 30%	8,1
ДТ 60 % + Э 40 % / DF 60% + E 40%	12,0
ДТ 50 % + Э 50 % / DF 50% + E 50%	16,3

*Примечания:*  $R$  – сопротивление между обкладками конденсатора равно 1,3 МОм;  $C$  – емкость конденсатора по воздуху (перед каждым измерением) равна 0,304 nF.

*Notes:*  $R$  – resistance between capacitor plates 1.3 Mom;  $C$  – air capacitance of the condenser (before each measurement) 0.304 nF.

*Источник:* здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.

*Source:* Hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

Полученные измерения указывают на то, что изменение процентного содержания РМ в составе топливной смеси в большей степени (в отличие от спирта) влияет на омическое сопротивление конденсатора постоянному току (табл. 2). Например, в смеси ДТ с 10 %-ным содержанием рапсового масла  $R = 12,4 \text{ МОм}$ , тогда как при добавлении РМ до 50 % значение становится  $R = 9,7 \text{ МОм}$ . Соответственно, происходит снижение при условии увеличения содержания РМ. При этом электроемкость состава, применяемого в качестве диэлектрика конденсатора, изменяется в противоположную сторону. С увеличением содержания РМ в АТ с 10 до 50 % растет и значение емкости с 0,757 nF до 0,820 nF.

Что касается величины прямоугольного переменного тока  $I$ , то здесь значение изменяется незначительно и пропорционально присутствию РМ. При увеличении содержания РМ в смеси происходит рост с 5,31 до 5,45 мкА, при добавлении сурепного масла – снижение (табл. 3).

Состав топлива с сурепным маслом имеет увеличенное сопротивление между обкладками конденсатора по отношению к смесям с РМ (табл. 3). В смеси ДТ с 30 %-ным содержанием рапсового масла  $R = 11,2 \text{ МОм}$ , а в смеси ДТ с 30 %-ным содержанием сурепного масла  $R = 28,0 \text{ МОм}$ . Величина же прямоугольного переменного тока в смеси ДТ с содержанием сурепного масла от 10 до 50 % снижается (с 4,1 до 2,3 мкА).



Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Электрические параметры топлив различного состава  
с добавлением до 50 % рапсового масла в смеси**

**Electrical parameters of fuels of various compositions  
with the addition of rapeseed oil up to 50% in the mixture**

Состав топлива / Fuel composition	Сопrotивление между обкладками конденсатора, R, МОм / Resistance between capacitor plates, MOm	Емкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, C, nF / Capacitance of the capacitor if there is the mixture between the plates, C, nF	Величина прямоугольного переменного тока с частотой 200 кГц I, при $t = 20^\circ\text{C}$ , мкА / Value of a rectangular alternating current with a frequency of 200 kHz I, at $t = 20^\circ\text{C}$ , MC
ДТ 90 % + PM 10 % / DF 90% + RSO 10%	12,4	0,757	5,31
ДТ 80 % + PM 20 % / DF 80% + RSO 20%	11,8	0,765	5,36
ДТ 70 % + PM 30 % / DF 70% + RSO 30%	11,2	0,780	5,38
ДТ 60 % + PM 40 % / DF 60% + RSO 40%	10,4	0,805	5,41
ДТ 50 % + PM 50 % / DF 50% + RSO 50%	9,7	0,820	5,45

*Примечание:* C – емкость конденсатора по воздуху (перед каждым измерением) равна 0,302nF.  
*Note:* C – air capacitance of the condenser (before each measurement) 0.302 nF.

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

**Электрические параметры топлив различного состава  
с добавлением до 50 % сурепного масла в смеси**

**Electrical parameters of fuels of various compositions  
with the addition of up to 50% of colza oil in the mixture**

Состав топлива / Fuel composition	Сопrotивление между обкладками конденсатора, R, МОм / Resistance between capacitor plates, MOm	Емкость конденсатора при наличии смеси между обкладками, C, nF / Capacitance of the capacitor if there is the mixture between the plates, C, nF	Величина прямоугольного переменного тока с частотой 200 кГц I, при $t = 20^\circ\text{C}$ , мкА / The value of a rectangular alternating current with a frequency of 200 kHz I, at $t = 20^\circ\text{C}$ , MC
ДТ 90 % + Сурепное масло 10 % / DF 90% + wintercress oil 10%	34,0	0,749	4,1
ДТ 80 % + Сурепное масло 20 % / DF 80% + wintercress oil 20%	30,0	0,760	3,8
ДТ 70 % + Сурепное масло 30 % / DF 70% + wintercress oil 30%	28,0	0,777	3,4
ДТ 60 % + Сурепное масло 40 % / DF 60% + wintercress oil 40%	27,0	0,801	2,9
ДТ 50 % + Сурепное масло 50 % / DF 50% + colza oil 50%	20,0	0,808	2,3

*Примечание:* C – емкость конденсатора по воздуху (перед каждым измерением) равна 0,304 nF.  
*Note:* C – air capacitance of the condenser (before each measurement) 0.304 nF.

Как и предполагалось, растительные масла не являются диэлектриками [23]. Анализ данных показывает неоднозначную зависимость для всех представленных смесей. Емкость конденсатора по воздуху при всех испытуемых 15 смесях АТ остается постоянной (табл. 1–3). Исследуемые величины нуждаются в дальнейшем детальном изучении причин возникновения таких зависимостей. Результаты расчета диэлектрической проницаемости представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

**Диэлектрическая проницаемость топлив различного состава с добавлением АТ до 50 % в смеси**

**Dielectric permittivity of fuels of various compositions with the addition of up to 50% of AF in the mixture**

№ п/п	Состав топлива / Fuel composition	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ / Dielectric permittivity $\epsilon$ at $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$		
		Этанол / Ethanol	Рапсовое масло / Rapeseed oil	Сурепное масло / Colza oil
1	90 % ДТ + 10 % Э / DF 90% + E 10%	3,05	–	–
2	90 % ДТ + 10 % РМ / DF 90% + RSO 10%	–	2,35	–
3	90 % ДТ + 10 % Сурепное масло / DF 90% + colza oil 10%	–	–	2,33
4	80 % ДТ + 20 % Э / DF 80% + E 20%	7,98	–	–
5	80 % ДТ + 20 % РМ / DF 80% + RSO 20%	–	2,41	–
6	80 % ДТ + 20 % Сурепное масло / DF 80% + colza oil 20%	–	–	2,5
7	70 % ДТ + 30 % Э / DF 70% + E 30%	27,5	–	–
8	70 % ДТ + 30 % РМ / DF 70% + RSO 30%	–	2,54	–
9	70 % ДТ + 30 % Сурепное масло / DF 70% + colza oil 30%	–	–	2,65
10	60 % ДТ + 40 % Э / DF 60% + E 40%	39,47	–	–
11	60 % ДТ + 40 % РМ / DF 60% + RSO 40%	–	2,63	–
12	60 % ДТ + 40 % Сурепное масло / DF 60% + colza oil 40%	–	–	2,76
13	50 % ДТ + 50 % Э / DF 50% + E 50%	45,31	–	–
14	50 % ДТ + 50 % РМ / DF 50% + RSO 50%	–	2,72	–
15	50 % ДТ + 50 % Сурепное масло / DF 50% + colza oil 50%	–	–	2,8

Сравнивая значения диэлектрической проницаемости всех представленных составов альтернативных топлив между минимальным и максимальным содержанием добавленного спирта и растительных масел в смесь, можно проследить зависимость. Обнаруживается взаимосвязь характера значений диэлектрической

проницаемости с электроемкостью конденсатора при наличии смеси между обкладками. Так, например, диэлектрическая проницаемость растет во всем диапазоне от 10 до 50 % добавленного этанола, рапсового и сурепного масел. Она равна значениям от  $\varepsilon = 3,05$  до 45,31; от  $\varepsilon = 2,35$  до 2,72; от  $\varepsilon = 2,33$  до 2,8.

**Обсуждение и заключение.** Изменение процентного содержания этанола в составе этанола-топливной эмульсии не влияет на омическое сопротивление конденсатора постоянному току, увеличение же массового содержания этанола с 10 до 50 % в составе эмульсии повышает электроемкость состава. Здесь емкость конденсатора при наличии смеси ДТ с содержанием этанола 10 % составляет  $C = 1,7$ . Добавление спирта 50 % в смесь дает емкость  $C = 16,3$  nF.

Установлено, что в смеси ДТ с 10 %-ным содержанием рапсового масла  $R = 12,4$  МОм, тогда как при добавлении РМ до 50 % значение становится  $R = 9,7$  МОм. Электроемкость состава, применяемого в качестве диэлектрика конденсатора, изменяется в иную сторону. С увеличением содержания РМ в АТ с 10 до 50 % растет и значение емкости от 0,757 nF до 0,820 nF.

Состав топлива с сурепным маслом имеет увеличенное сопротивление между обкладками конденсатора. Величина прямоугольного переменного тока в смеси ДТ с содержанием сурепного масла от 10 до 50 % снижается (с 4,1 до 2,3 мкА).

Взаимосвязь прослеживается между характером значений диэлектрической проницаемости с электроемкостью конденсатора при наличии смеси между обкладками, причем во всех трех добавляемых в смесь углеводородах (этанол, рапсовое и сурепное масла).

На основе полученных данных в дальнейшем будет производиться выяснение связи диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  с показателями процесса сгорания: максимальным давлением цикла  $P_z$ , жесткостью процесса сгорания  $(dp/d\varphi)_{\max}$ , скоростью тепловыделения  $(d\chi/d\varphi)_{\max}$  и т. д. Результаты проведенного исследования вносят вклад в развитие анализа процесса действия двигателей внутреннего сгорания при работе на альтернативном топливе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Determination of the Water Content in Petroleum Products Using Terahertz Transmission Spectroscopy / S. Gorenflo [et al.] // Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics. 2006. Vol. 6120. Article no. 61200L. <https://doi.org/10.1117/12.644495>
2. Скворцов Б. В., Силов Е. А., Солнцева А. В. Определение взаимосвязи показателей детонационной стойкости с электродинамическими параметрами углеводородных топлив на основе статистического моделирования компонентного состава // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 1 (21). С. 166–173. URL: <https://clck.ru/3ARhsG> (дата обращения: 08.10.2023).
3. Табрисов И. И., Султанова Р. Б., Николаев В. Ф. Рефракто-денсиметрический метод контроля автомобильных бензинов на соответствие нормативам евро-4 и -5 по суммарному содержанию ароматических углеводородов и содержанию кислорода // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 9. С. 228–232. URL: <https://clck.ru/3ARkSa> (дата обращения: 08.10.2023).
4. Плотников С. А., Гневашев П. В. Эксперс-методы оценки моторных свойств дизельных топлив // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88, № 2. С. 16–20. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-2-16-20>

5. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств топлив для сельскохозяйственной техники / С. А. Плотников [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2021. Т. 13, № 2. С. 110–115. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.50.2.015>
6. Безмоторные методы оценки эксплуатационных свойств альтернативных топлив с добавками этанола / С. А. Плотников [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2022. № 6 (90). С. 72–76. EDN: QWVVMO
7. Визуализация группового состава светлых нефтепродуктов и жидких продуктов органического синтеза / В. Ф. Николаев [и др.] // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 22, С. 43–46. EDN: VDKHXP
8. Express Method for Total Content Assessment of Aromatic Hydrocarbons and Oxygen in Finished Gasolines by Refractometry and Densimetry / V. F. Nikolaev [et al.] // Fuel. 2015. Vol. 142. P. 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.042>
9. Ladommatos N., Goacher J. Equations for Predicting the Cetane Number of Diesel Fuels from Their Physical Properties // Fuel. 1995. Vol. 74, Issue 7. P. 1083–1093. EDN: AOMQKR
10. A Close Dielectric Spectroscopic Analysis of Diesel/Biodiesel Blends and Potential Dielectric Approaches for Biodiesel Content Assessment / J. E. De Souza [et al.] // Fuel. 2013. Vol. 105. P. 705–710. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.032>
11. Theoretical Basis of Application of the Parameter of Dielectric Permeability of Hydrocarbon Feedstock during its Processing / N. A. Sater [et al.] // EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. 2023. P. 139–150. URL: <https://clck.ru/3ARqLf> (дата обращения: 08.10.2023).
12. Dielectric Characterization of Geochemical Properties of Liquid Hydrocarbons from 25 °C to 125 °C / J. O. Alvarez [et al.] // Fuel. 2021. Vol. 288. Article no. 119679. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119679>
13. Arik E., Altan H., Esenturk O. Dielectric Properties of Diesel and Gasoline by Terahertz Spectroscopy // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2014. Vol. 35, Issue 9. P. 759–769. URL: <https://clck.ru/3ARsG7> (дата обращения: 08.10.2023).

## REFERENCES

1. Gorenflo S., Tauer U., Hinkov I., Lambrecht A., Helm H. Determination of the Water Content in Petroleum Products Using Terahertz Transmission Spectroscopy. *Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics*. 2006;6120:61200L. <https://doi.org/10.1117/12.644495>
2. Skvortsov B.V., Silov E.A., Solntseva A.V. [Determining the Interrelation Between Detonation Characteristics Indicators and Electrodynamic Parameters of Hydrocarbon Fuels on the Basis of Statistical Modelling of Componental Structure]. *Vestnik of Samara University*. 2010;(1);166–173. Available at: <https://clck.ru/3ARhsG> (accessed 08.10.2023). (In Russ.)
3. Tabrisov R.B., Sultanova V.F., Nikolaev A. Refracto-Densimetric Method for Controlling Motor Gasoline Regulatory Compliance with Euro-4 and -5 on Total Aromatic Hydrocarbon and Oxygen Content]. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012;(9):228–232. Available at: <https://clck.ru/3ARkSa> (accessed 08.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Plotnikov S.A., Gnevashev P.V. Determination of the Optimal Composition of Mixed Fuel Based on Environmental Indicators of Diesel Engine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2021;88(2):16–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-2-16-20>
5. Plotnikov S.A., Shishkin G.P., Reznik E.N., Gnevashev P.V., Smolnikov M.V. Engineless Methods of the Estimation of Operational Properties Fuels for Agricultural Machinery. *Herald of Ryzan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2021;13(2):110–115. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.50.2.015>

6. Plotnikov S.A., Shishkin G.P., Smolnikov M.V., Gnevashov P.V., Kutergin N.Yu. Non-Motorized Methods for Evaluating the Operational Properties of Alternative Fuels with Ethanol Additives. *Alternative Fuel Transport*. 2022;(6):72–76. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QWVVMO
7. Nikolaev V.F., Romanova U.G., Tabrisov I.I., Mineev A.E., Valeev T.A., Ilyasov R.A., et al. [Visualization of Group Composition of Light Petroleum Products and Liquid Organic Synthesis Products]. *Herald of Technological University*. 2015;18(22):43–46. (In Russ.) EDN: VDKHXP
8. Nikolaev V.F., Tabrisov I.I., Penkovsky A.I., Sultanova R.B. Express Method for Total Content Assessment of Aromatic Hydrocarbons and Oxygen in Finished Gasolines by Refractometry and Densimetry. *Fuel*. 2015;142:94–101. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.042>
9. Ladommatos N., Goacher J. Equations for Predicting the Cetane Number of Diesel Fuels from Their Physical Properties. *Fuel*. 1995;74(7):1083–1093. EDN: AOMQKR
10. De Souza J.E., Scherer V.D., Caceres J.A.S., Caires A.R.L., M'Peko J.C. A Close Dielectric Spectroscopic Analysis of Diesel/Biodiesel Blends and Potential Dielectric Approaches for Biodiesel Content Assessment. *Fuel*. 2013;105:705–710. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.032>
11. Sater N.A., Grigorov A., Tulska A., Nahliuk M., Lazorik P. Theoretical Basis of Application of the Parameter of Dielectric Permeability of Hydrocarbon Feedstock During its Processing. *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice*. 2023;139–150. Available at: <https://clck.ru/3ARqLf> (accessed 08.10.2023).
12. Alvarez J.O., Jacobi D., Althaus S., Elias S. Dielectric Characterization of Geochemical Properties of Liquid Hydrocarbons from 25 °C to 125 °C. *Fuel*. 2021;288:119679. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119679>
13. Arik E., Altan H., Esenturk O. Dielectric Properties of Diesel and Gasoline by Terahertz Spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 2014;35(9):759–769. Available at: <https://clck.ru/3ARsG7> (accessed 08.10.2023).

*Об авторах:*

**Плотников Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, PlotnikovSA@bk.ru

**Гневашев Павел Вячеславович**, аспирант кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1131-9195>, Researcher ID: JNE-2158-2023, pasha-moon@mail.ru

**Шишкин Геннадий Петрович**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики и медицинской информатики Кировского государственного медицинского университета (610027, Российская Федерация, г. Киров, улица К. Маркса, д. 112), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6591-8653>, Researcher ID: JPE-5148-2023, shgp45@mail.ru

**Карташевич Анатолий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и машин для природообустройства Белорусской государственной сельскохозяйственной академии (213407, Республика Беларусь, г. Горки, ул. Мичурина, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>, kartashevich@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

С. А. Плотников – общее руководство, постановка задач исследования.

П. В. Гневашев – проведение лабораторных исследований.

Г. П. Шишкин – теоретический анализ.

А. Н. Карташевич – теоретический анализ.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 08.12.2023; поступила после рецензирования 14.12.2023;  
принята к публикации 25.12.2023*

*About the authors:*

**Sergey A. Plotnikov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, [PlotnikovSA@bk.ru](mailto:PlotnikovSA@bk.ru)

**Pavel V. Gnevashev**, Postgraduate Student of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1131-9195>, Researcher ID: JNE-2158-2023, [pasha-moon@mail.ru](mailto:pasha-moon@mail.ru)

**Gennady P. Shishkin**, Cand.Sci. (Ped.), Associate Professor of the Chair of Physics and Medical Informatics, Kirov State Medical University (112 Karl Marx St., Kirov 610027, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6591-8653>, Researcher ID: JPE-5148-2023, [shgp45@mail.ru](mailto:shgp45@mail.ru)

**Anatoly N. Kartashevich**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Tractors, Cars and Machines for Environmental Management, Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurina St., Gorki 213407, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>, [kartashevich@yandex.ru](mailto:kartashevich@yandex.ru)

*Authors contribution:*

S. A. Plotnikov – general guidance, formulation of research objectives.

P. V. Gnevashev – laboratory research.

G. P. Shishkin – theoretical analysis.

A. N. Kartashevich – theoretical analysis

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 08.12.2023; revised 14.12.2023; accepted 25.12.2023*





## Моделирование приготовления комбикормов-концентратов при изменении состава машин и комбикормовых агрегатов

**И. Е. Припоров**

*Кубанский государственный аграрный университет  
имени И. Т. Трубилина (г. Краснодар, Российская Федерация)*

✉ [i.priporov@yandex.ru](mailto:i.priporov@yandex.ru)

### **Аннотация**

*Введение.* Для ведения малых хозяйств актуальной является задача приспособления типовых комбикормовых агрегатов к местным кормам. Из семечек подсолнечника необходимо получать масло и жирный жмых для крупного рогатого скота. Универсальных прессов, которые подходили бы для этого, нет. Сложности вызывает и процесс измельчения жмыха. В связи с этим существует высокая необходимость в наборе специальных машин для данного вида операции.

*Цель исследования.* Разработка математической модели приготовления подсолнечного жмыха на участке и комбикормов-концентратов на комбикормовом агрегате, которая позволит определять оптимальный участок и агрегат с минимальными технико-экономическими показателями.

*Материалы и методы.* Разработанный алгоритм с учетом математической модели реализован в программе Microsoft Excel 2016. Результаты и расчеты по выбору рационального варианта машин для участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата представлены в тексте статьи. Техничко-экономические показатели и затраты на помещение цеха и его эксплуатацию рассчитаны согласно рекомендациям доктора технических наук, профессора В. В. Коновалова с учетом полученных выражений для технологического расчета.

*Результаты исследования.* В статье разработана математическая модель приготовления комбикормов-концентратов. Проведенные расчеты по выбору рационального варианта участка и комбикормового агрегата показали схемы машин, которые удовлетворяют поставленным задачам настоящего исследования.

*Обсуждение и заключение.* Для рассматриваемых условий эффективным вариантом среди представленных участков с экономической точки зрения являются участок и комбикормовый агрегат, представленные на схеме 1 (табл. 1). На основе разработанного алгоритма с учетом математической модели приготовления комбикорма-концентрата и программы для его реализации проведен технологический расчет участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата, а также рассчитаны их технико-экономические показатели и затраты на помещение цеха и его эксплуатацию, выбран рациональный вариант участка и комбикормового агрегата. Экономический эффект получен за счет снижения годовых эксплуатационных и прочих прямых издержек.

**Ключевые слова:** моделирование, животноводческие предприятия, жмых подсолнечный, корма местные, комбикорм-концентрат, комбикормовый агрегат

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Припоров И. Е., 2024



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

**Финансирование:** работа выполнена в рамках госбюджетной НИР.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

**Для цитирования:** Припоров И. Е. Моделирование приготовления комбикормов-концентратов при изменении состава машин и комбикормовых агрегатов // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 191–212. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.191-212>

## Modeling of the Producing Concentrated Compound Feed when Changing the Compound Feed Machinery

I. E. Priporov

I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University  
(Krasnodar, Russian Federation)

✉ [i.priporov@yandex.ru](mailto:i.priporov@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** For small farms, an urgent task is to adapt standard compound feed machinery for producing the specified local feeds. It is necessary to use sunflower seeds for producing oil and fat sunflower meal for cattle. There are no universal presses suitable for producing sunflower meal. The process of crushing sunflower meal also causes difficulties. Therefore, we need a set of machines for this operation.

**Aim of the Study.** The article is aimed at developing a mathematical model for producing sunflower meal on the field plot and feed concentrates with the use of the compound feed machinery, and for determining the optimal field plot and machinery with minimal technical and economic indicators.

**Materials and Methods.** The developed algorithm in view of the mathematical model is implemented in the Microsoft Excel 2016 program. The results and calculations for the choice of rational option of machinery for producing sunflower meal on a field plot are presented in the text of the article. Technical and economic indicators and costs of the workshop and its operation are calculated according to the recommendations of Doctor of technical sciences, Professor V. V. Konovalov, but taking into account the expressions obtained for technological calculation.

**Results.** A mathematical model for producing concentrated compound feed is developed. The calculations carried out for the choice of a rational option of the field plot and the compound feed machinery showed the schemes of machines that meet the objectives of the study.

**Discussion and Conclusion.** For the conditions under consideration, an effective option among the presented field plots, from an economic point of view, is the field plot and compound feed machinery presented at the scheme 1 (table 1). Technological calculation of the sunflower meal production plot and the compound feed machinery was carried out based on the developed algorithm in view of the mathematical model for producing concentrated compound feed and the program for its implementation, their technical and economic indicators, and the costs of the workshop and its operation were calculated, and the rational option of the field plot and the compound feed machinery were selected. The economic effect of the selected field plot and compound feed machine was achieved by reducing annual operating and other direct costs, reduced costs.

**Keywords:** modeling, livestock enterprises, sunflower meal, local feed, concentrated compound feed, compound feed machinery

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

**Funding:** The study was carried out as part of the state budget research.

**Acknowledgements:** The authors would like to thank anonymous reviewers.

**For citation:** Priporov I.E. Modeling of the Producing Concentrated Compound Feed when Changing the Compound Feed Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):191–212. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.191-212>

**Введение.** Для повышения эффективности отрасли животноводства необходима кормовая база, которая обеспечивала бы фермы качественными кормами. Важная роль отводится технологиям, которые направлены на приготовление кормов на фермах [1]. Многие предприятия малых форм хозяйствования не производят покупку кормов, их приготовление происходит на месте в небольших комбикормовых агрегатах, которые выполняют разные технологические операции. Приготовление кормов непосредственно на животноводческих предприятиях позволяет снизить вероятность приобретения продукта плохого качества и затраты на его транспортирование, хранение и приготовление [2; 3]. Большое значение имеют использование в достаточном количестве концентрированных кормов и постоянный рост их питательности [4].

Перед малыми хозяйствами поставлена задача приспособления типовых комбикормовых агрегатов под местные корма. Из семечек подсолнечника необходимо получать масло и жирный жмых для крупного рогатого скота (далее – КРС). В настоящее время нет универсальных процессов, которые подходили бы для получения жмыха.

Цель исследования – разработать математическую модель приготовления жмыха подсолнечного на участке и комбикормов-концентратов на комбикормовом агрегате, позволяющую определять оптимальный участок и агрегат с минимальными технико-экономическими показателями.

**Обзор литературы.** Математическая модель (далее – ММ) эффективности использования потенциала животного, разработанная В. Ю. Фроловым и Д. П. Сысоевым, позволяет увязать технико-экономические показатели с коэффициентом эффективности системы. Приведенная ММ требует эмпирического установления характера изменения сомножителей коэффициента эффективности системы [4].

По мнению доктора технических наук, профессора В. В. Коновалова и его коллег, в модели показатели имеют зоотехническую и ветеринарную основу. На их взгляд, влияние породы и генетики, а также здоровья и особенностей животного возможно объединить. Для технической службы важны показатели, которые обеспечивают животное потребным количеством и качеством воды и корма [4].

В свою очередь В. В. Коновалов получил ММ, которая определяет молочную продуктивность коров при изменении технологических процессов на ферме и оценивает экономическую эффективность мероприятий с учетом соблюдения технологических требований [4]. Недостаток данной ММ в том, что она не позволяет увязать одновременно технологический расчет, технико-экономические показатели участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата (далее – КА) и затраты на помещение цеха, его эксплуатацию.

А. М. Валге и А. Н. Перекопский предложили целевую функцию ММ, которая позволяет определять влияние стоимостей различных видов кормов покупных

и собственного производства на рациональную структуру и стоимость всего его объема по заданному уровню молочной продуктивности коров [5]. Данная ММ не применима для приготовления жмыха подсолнечного. С. В. Вараксин, С. М. Доценко и Л. Г. Крючкова разработали экономико-математическую модель (далее – ЭММ) для оценивания функционирования системы приготовления кормовых продуктов разной физической формы с добавлением соево-зерновых композиций для малых ферм на стадии ее проектирования [6].

Другие ЭММ предложены профессорами С. М. Доценко и А. В. Бурмага для оценивания технологии приготовления продуктов на основе соево-растительных и тыквенно-зерновых композиций, которая позволяет на стадии их проектирования получить данные для эффективности функционирования системы<sup>1</sup> [7]. Предложенная авторами ЭММ не пригодна для приготовления комбикорма и жмыха из семян подсолнечника. С. Ю. Булатов и соавторы предложили ММ приготовления кормов для малых форм хозяйствования, которая позволяет выявить основные пути повышения эффективности их производства [8]. Ее недостаток в том, что она не пригодна для приготовления жмыха из семян подсолнечника, а также не учитывает технико-экономические показатели разработанного и предложенного оборудования для производства жмыха в условиях малых форм хозяйствования.

Проведенные исследования В. Д. Павлидиса позволили разработать стохастическую модель технологического процесса промышленного производства комбикормов, которая базируется на целостности технологической системы [9–11]. Данная модель не учитывает технико-экономические показатели приготовления комбикорма и жмыха из семян подсолнечника [12–14].

На основании проведенных исследований профессора А. В. Бурмага и др. получена ММ, которая позволяет провести оценку увлажненно-обогащенного состояния зерновки по равномерности ее насыщения питательными веществами [15], однако эта модель не пригодна для приготовления жмыха из семян подсолнечника.

П. Ю. Крупенин предложил ММ, которая описывает импульсный характер движения кормовой суспензии по каналам роторного аппарата с учетом блокировки его частицами проходного сечения между каналами ротора и статора и позволяет определять подачу роторного импульсного аппарата с погрешностью от 4 до 8 % [16]. Данная модель не позволяет приготовить подсолнечный жмых и не учитывает технико-экономические показатели.

Авторы исследования [17] разработали ММ для проведения исследований неявных переменных в сложной системе накопления и энтропии обменной энергии корма, принятия оптимальных инженерных решений по обоснованию и совершенствованию технологий возделывания, уборки и приготовления кормов, а также их эффективному использованию. Недостаток ММ – она охватывает большинство вопросов приготовления кормов, но не пригодна для приготовления подсолнечного жмыха.

Также существует ММ процесса смешивания жидких кормов в экспериментальной установке на основе теоретической механики и гидравлики [18]. Однако она неприменима для приготовления жмыха подсолнечного.

<sup>1</sup>Научно-практические основы технологии приготовления формованных кормовых продуктов с использованием тыквенно-зерновых композиций / С. М. Доценко [и др.]. Благовещенск : Изд-во Дальневост. гос. аграр. ун-та, 2017. 350 с.

Некоторыми исследователями рассмотрен системный подход применительно к технологическому процессу смешивания разных компонентов смеси, который представлен в виде детерминированной модели функционирования смесителя кормов периодического действия на всех этапах его работы: от их загрузки до приема и выгрузки готовой кормосмеси [19; 20].

В ряде исследований решается задача имитационного моделирования процесса смешивания двухкомпонентного материала [21–23]. Опыты проводились на моделях лопастных смесителей со стержневыми элементами и без них [24–26].

Ученые описали зависимость между мощностью смесителя и степенью измельчения продукта, частотой вращения шнека, коэффициентами трения, количеством витков на единицу длины и шириной шнековой ленты [27–29].

В том числе была предложена ММ дискретных процессов для описания потока комбикорма и генерации воздействий управления. В совокупности с разработанной пробной аппаратной реализацией блока управления (на базе интегрированной платы Arduino) открываются перспективы в создании и функциональном наполнении системы управления современных комбикормовых заводов [30].

Однако предложенные модели имеют ряд недостатков: в них не учитывается оборудование для приготовления подсолнечного жмыха и комбикорма-концентрата, а также они не подходят для животноводческих предприятий малых форм хозяйствования.

**Материалы и методы.** Автором настоящего исследования разработана ММ, которая устанавливает связь между технологическим расчетом, технико-экономическими показателями участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата, а также затратами на помещение комбикормового цеха и его эксплуатацию. ММ имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ж} = a \cdot n_{ж}, P_{КК} = a \cdot n_{КК}, P_{пш} = a \cdot n_{пш}, P_{яч} = a \cdot n_{яч}; \\ P_{гор} = a \cdot n_{гор}; P_{дер.пш} = a \cdot n_{дер.пш}, P_{дер.яч} = a \cdot n_{дер.яч}; \\ P_{дер.гор} = a \cdot n_{дер.гор}; P_{с.п} = \frac{P_{ж}}{k_M}; m_{с.п} = \frac{P_{ж}}{k_M}; \\ V_{б.вор.пш} = \frac{m_{пш}}{\rho_{пш} \cdot \psi}; V_{б.вор.яч} = \frac{m_{яч}}{\rho_{яч} \cdot \psi}; V_{б.вор.гор} = \frac{m_{гор}}{\rho_{гор} \cdot \psi}; \\ V_{б.вор.с.п} = \frac{m_{с.п}}{\rho_{с.п} \cdot \psi}; V_{б.дер.пш} = \frac{m_{б.дер.пш}}{\rho_{дер.пш} \cdot \psi}; V_{б.дер.яч} = \frac{m_{б.дер.яч}}{\rho_{дер.яч} \cdot \psi}; \\ V_{б.дер.гор} = \frac{m_{б.дер.гор}}{\rho_{дер.гор} \cdot \psi}; V_{б.изм.ж} = \frac{m_{б.ж}}{\rho_{ж} \cdot \psi}; V_{б.КК} = \frac{m_{б.КК}}{\rho_{КК} \cdot \psi}; \\ M_{б.вор.пш} = V_{б.вор.пш} \cdot \rho_{пш} \cdot \psi; M_{б.вор.яч} = V_{б.вор.яч} \cdot \rho_{яч} \cdot \psi; \\ M_{б.вор.гор} = V_{б.вор.гор} \cdot \rho_{гор} \cdot \psi; M_{б.вор.с.п} = V_{б.вор.с.п} \cdot \rho_{с.п} \cdot \psi; \\ M_{б.дер.вор.пш} = V_{б.дер.пш} \cdot \rho_{дер.пш} \cdot \psi; M_{б.дер.вор.яч} = V_{б.дер.яч} \cdot \rho_{дер.яч} \cdot \psi; \\ M_{б.дер.вор.гор} = V_{б.дер.гор} \cdot \rho_{дер.гор} \cdot \psi; M_{б.изм.ж} = V_{б.изм.ж} \cdot \rho_{ж} \cdot \psi; \\ M_{б.КК} = V_{б.КК} \cdot \rho_{КК} \cdot \psi; \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
 & Z_{д.изм.ж} = \frac{M_{б.изм.ж}}{P_{ж}}; Z_{д.вор.с.п} = \frac{M_{б.вор.с.п}}{m_{с.п}}; Z_{д.вор.пш} = \frac{M_{б.вор.пш}}{P_{пш}}; \\
 & Z_{д.вор.яч} = \frac{M_{б.вор.яч}}{P_{яч}}; Z_{д.вор.гор} = \frac{M_{б.вор.гор}}{P_{гор}}; Z_{д.дер.вор.пш} = \frac{M_{б.дер.вор.пш}}{P_{дер.пш}}; \\
 & Z_{д.дер.вор.яч} = \frac{M_{б.дер.вор.яч}}{P_{дер.яч}}; Z_{д.дер.вор.гор} = \frac{M_{б.дер.вор.гор}}{P_{дер.гор}}; \\
 & Z_{д.КК} = \frac{(M_{б.вор.дер} + M_{б.вор.зер.копм})}{P_{КК}}; \\
 & Z_{д} = \min(Z_{д.КК}; Z_{д.изм.ж}; Z_{д.вор.с.п}; Z_{д.вор.пш}; Z_{д.вор.яч}; Z_{д.вор.гор}; \\
 & Z_{д.дер.вор.пш}; Z_{д.дер.вор.яч}; Z_{д.дер.вор.гор}); \\
 & Z_{д.изм.ж0} = T_{с} \cdot \frac{G_{ж}}{P_{ж}} \rightarrow \min; Z_{д.вор.с.п0} = T_{с} \cdot \frac{G_{ж}}{P_{с.п}} \rightarrow \min; \\
 & 6 > Z_{д.изм.ж0} \leq 2; 5 > Z_{д.вор.с.п0} \leq 2; \\
 & Z_{д.вор.пш0} = T_{с} \cdot \frac{G_{а.э}}{P_{пш}} \rightarrow \min; 48 > Z_{д.вор.пш0} \leq 9; \\
 & Z_{д.вор.яч0} = T_{с} \cdot \frac{G_{а.э}}{P_{яч}} \rightarrow \min; 48 > Z_{д.вор.яч0} \leq 9; \\
 & Z_{д.вор.гор0} = T_{с} \cdot \frac{G_{а.э}}{P_{гор}} \rightarrow \min; 68 > Z_{д.вор.гор0} \leq 13; \\
 & Z_{д.дер.вор.пш0} = T_{с} \cdot \frac{G_{а.э}}{P_{дер.пш}} \rightarrow \min; 120 > Z_{д.дер.вор.пш0} \leq 24; \\
 & Z_{д.дер.вор.яч0} = T_{с} \cdot \frac{G_{а.э}}{P_{дер.яч}} \rightarrow \min; 96 > Z_{д.дер.вор.яч0} \leq 19; \\
 & Z_{д.дер.вор.гор0} = T_{с} \cdot \frac{G_{а.э}}{P_{дер.гор}} \rightarrow \min; 184 > Z_{д.дер.вор.гор0} \leq 36; \\
 & Z_{д.КК0} = T_{с} \cdot \frac{G_{а.э}}{P_{КК}} \rightarrow \min; 15 > Z_{д.КК0} \leq 3; \\
 & Z_{д} = \min(Z_{д.изм.ж0}; Z_{д.изм.ж}; Z_{д.вор.с.п}; Z_{д.вор.с.п0}; Z_{д.вор.пш}; Z_{д.вор.пш0}; \\
 & Z_{д.вор.яч}; Z_{д.вор.яч0}; Z_{д.вор.гор}; Z_{д.вор.гор0}; Z_{д.дер.вор.пш}; Z_{д.дер.вор.пш0}; \\
 & Z_{д.дер.вор.яч}; Z_{д.дер.вор.яч0}; Z_{д.дер.вор.гор}; Z_{д.дер.вор.гор0}; Z_{д.КК}; Z_{д.КК0}); \\
 & P_{жм} = Z_{д} \cdot a \cdot n_{ж}; P_{из} = Z_{д} \cdot a \cdot (n_{зерно.пш} + n_{зерно.яч} + n_{зерно.гор}); \\
 & P_{кон} = Z_{д} \cdot a \cdot n_{КК}; \\
 & t_{ф.у} = \frac{Z_{д} \cdot P_{ж}}{G_{ж}} \rightarrow \max; t_{ф.а} = \frac{Z_{д} \cdot P_{КК}}{G_{а.э}} \rightarrow \max; \\
 & 3,08 < t_{ф.у} \leq 1,29; 2,58 < t_{ф.а} \leq 0,52;
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & t_y = \frac{Z_{\pi} \cdot P_{\text{ж}}}{G_{\text{ж}} \cdot k_{\text{смы}}} \rightarrow \max; t_a = \frac{Z_{\pi} \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \rightarrow \max; \\
 & 3,85 < t_y \leq 1,61; 3,23 < t_a \leq 0,65; \\
 & t_{\text{ay}} = \max(t_y; t_a); \tau_c = \frac{365}{Z_{\pi}}; \\
 & T_{\text{yж}} = \frac{365 \cdot P_{\text{ж}}}{G_{\text{ж}}} \rightarrow \max; T_a = \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}}} \rightarrow \max; \\
 & 1123 < T_{\text{yж}} \leq 471; 943 < T_a \leq 189; \\
 & T_{\text{a.y}} = \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \rightarrow \max; 1404 > T_{\text{a.y}} \leq 589; \\
 & P_{\text{эa}} = N_a \cdot 365 \cdot \frac{P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}}} \cdot N_{\text{ч}} \rightarrow \min; 54872 > P_{\text{эa}} \leq 15689; \\
 & E_a = \frac{N_a \cdot N_{\text{ч}}}{G_{\text{а.э}}} \rightarrow \min; 0,0970 > E_a \leq 0,0277; \\
 & P_{\text{эy}} = N_y \cdot \frac{365 \cdot P_{\text{жм}}}{G_{\text{ж}}} \rightarrow \min; 47231 > P_{\text{эy}} \leq 15689; \\
 & E_y = \frac{N_y}{G_{\text{ж}}} \rightarrow \min; 0,6470 > E_y \leq 0,2149; \\
 & 3_{\pi} = \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \cdot C_{\text{ч}} \cdot 2,15 \rightarrow \min; 51481464 > 3_{\pi} \leq 21589001; \\
 & Б_{\text{ca}} = 1,4 \cdot C_{\text{aa}} \rightarrow \min; Б_{\text{cy}} = 1,4 \cdot C_{\text{ay}} \rightarrow \min; \\
 & 18410000 > Б_{\text{ca}} \leq 3990000; 4480000 > Б_{\text{cy}} \leq 947520; \\
 & \Gamma_{\text{эa}} = \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \cdot (2,15 \cdot C_{\text{ч}} + N_a \cdot \Pi_{\text{э}}) + 1,4 \cdot C_{\text{aa}} \left( \frac{p}{100} + \frac{a}{100} \right) \rightarrow \min; \\
 & 51785109 > \Gamma_{\text{эa}} \leq 21765505; \\
 & \Gamma_{\text{эy}} = \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \cdot 2,15 \cdot C_{\text{ч}} + 1,4 \cdot C_{\text{ay}} \left( \frac{p}{100} + \frac{a}{100} \right) + N_y \frac{365 \cdot P_{\text{жм}}}{G_{\text{ж}}} \cdot \Pi_{\text{э}} \rightarrow \min; \\
 & 52195233 > \Gamma_{\text{эy}} \leq 22078486; \\
 & \Pi_{\text{py}} = \frac{\Pi}{100} \cdot \left[ \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \cdot 2,15 \cdot C_{\text{ч}} + 1,4 \cdot C_{\text{ay}} \left( \frac{p}{100} + \frac{a}{100} \right) + \right. \\
 & \quad \left. + N_y \frac{365 \cdot P_{\text{жм}}}{G_{\text{ж}}} \cdot \Pi_{\text{э}} \rightarrow \min; \right]; \\
 & \Pi_{\text{pa}} = \frac{\Pi}{100} \cdot \left[ \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \cdot (2,15 \cdot C_{\text{ч}} + N_a \cdot \Pi_{\text{э}}) + 1,4 \cdot C_{\text{aa}} \left( \frac{p}{100} + \frac{a}{100} \right) + \right. \\
 & \quad \left. + N_y \frac{365 \cdot P_{\text{жм}}}{G_{\text{ж}}} \cdot \Pi_{\text{э}} \rightarrow \min; \right]; \\
 & 5219523 > \Pi_{\text{py}} \leq 2207849; 5178511 > \Pi_{\text{pa}} \leq 2176550;
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\text{пом.у}} = 3 \cdot F_{\text{п.у}} \cdot Z_{\text{ау}} + \frac{V_{\text{х.у}}}{1,5}; \\ F_{\text{пом.а}} = 3 \cdot F_{\text{п.а}} \cdot Z_{\text{аа}} + \frac{V_{\text{х.а}}}{1,5}; \\ 3_{\text{пом.у}} = C_{\text{пом}} \cdot \left( 3 \cdot F_{\text{п.у}} \cdot Z_{\text{ау}} + \frac{V_{\text{х.у}}}{1,5} \right) \rightarrow \min; \\ 3_{\text{пом.а}} = C_{\text{пом}} \cdot \left( 3 \cdot F_{\text{п.а}} \cdot Z_{\text{аа}} + \frac{V_{\text{х.а}}}{1,5} \right) \rightarrow \min; \\ 1992887 > 3_{\text{пом.у}} \leq 812184; 7475113 > 3_{\text{пом.а}} \leq 1136619; \\ P_{\text{ра}} = \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \cdot (2,15 \cdot C_{\text{ч}} + N_{\text{а}} \cdot \text{Ц}_{\text{э}}) + 1,4 \cdot C_{\text{аа}} \left( \frac{p}{100} + \frac{a}{100} \right) + \\ + C_{\text{пом}} \cdot \left( 3 \cdot F_{\text{п.а}} \cdot Z_{\text{аа}} + \frac{V_{\text{х.а}}}{1,5} \right) + E_{\text{н}} \cdot 1,4 \cdot C_{\text{аа}} \rightarrow \min; \\ P_{\text{з.у}} = \frac{365 \cdot P_{\text{КК}}}{G_{\text{а.э}} \cdot k_{\text{сма}}} \cdot 2,15 \cdot C_{\text{ч}} + 1,4 \cdot C_{\text{ау}} \left( \frac{p}{100} + \frac{a}{100} \right) + \\ + N_{\text{у}} \cdot \frac{365 \cdot P_{\text{жм}}}{G_{\text{ж}}} \cdot \text{Ц}_{\text{э}} + C_{\text{пом}} \cdot \left( 3 \cdot F_{\text{п.у}} \cdot Z_{\text{ау}} + \frac{V_{\text{х.у}}}{1,5} \right) + E_{\text{н}} \cdot 1,4 \cdot C_{\text{аа}} \rightarrow \min; \\ 58782604 > P_{\text{з.а}} \leq 28743399; 53573646 > P_{\text{з.у}} \leq 23949069, \end{array} \right.$$

где,  $P_{\text{ж}}, P_{\text{КК}}, P_{\text{пш}}, P_{\text{яч}}, P_{\text{гор}}, P_{\text{гор}}, P_{\text{дер.пш}}, P_{\text{дер.яч}}, P_{\text{дер.гор}}, P_{\text{с.п}}$  – массы суточного потребления измельченного жмыха, комбикорма-концентрата, вороха зерна пшеницы, ячменя и гороха, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти вороха гороха, вороха семян подсолнечника, кг/сут;  $k_{\text{м}}$  – коэффициент выхода масла подсолнечного ( $k_{\text{м}} = 0,9$ );  $a$  – поголовье КРС, гол.;  $m_{\text{с.п}}$  – масса вороха семян подсолнечника, которая необходима для приготовления жмыха КРС, кг;  $p_{\text{ж}}, p_{\text{КК}}, p_{\text{пш}}, p_{\text{яч}}, p_{\text{гор}}, p_{\text{дер.пш}}, p_{\text{дер.яч}}, p_{\text{дер.гор}}$  – норма выдачи измельченного жмыха, комбикорма-концентрата, вороха зерна пшеницы, ячменя и гороха, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти вороха гороха на голову, кг/сут;  $V_{\text{б.вор.пш}}, V_{\text{б.вор.яч}}, V_{\text{б.вор.гор}}, V_{\text{б.вор.с.п}}, V_{\text{б.дер.пш}}, V_{\text{б.дер.яч}}, V_{\text{б.изм.ж}}, V_{\text{б.КК}}$  – объемы бункеров для вороха зерна пшеницы, ячменя и гороха, вороха семян подсолнечника, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти вороха гороха, измельченного жмыха и комбикорма-концентрата, м<sup>3</sup>;  $m_{\text{пш}}, m_{\text{яч}}, m_{\text{гор}}, m_{\text{б.дер.пш}}, m_{\text{б.дер.яч}}, m_{\text{б.дер.гор}}, m_{\text{б.ж}}, m_{\text{б.КК}}$  – массы вороха зерна пшеницы, ячменя и гороха, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти вороха гороха, измельченного жмыха, комбикорма-концентрата соответственно, кг;  $\psi$  – степень заполнения бункера ( $\psi = 0,8$ );  $\rho_{\text{пш}}, \rho_{\text{яч}}, \rho_{\text{гор}}, \rho_{\text{с}}, \rho_{\text{дер.пш}}, \rho_{\text{дер.яч}}, \rho_{\text{дер.гор}}, \rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{КК}}$  – плотности вороха зерна пшеницы, ячменя и гороха, вороха семян подсолнечника, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти вороха гороха, измельченного жмыха и комбикорма-концентрата соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $M_{\text{б.вор.пш}}, M_{\text{б.вор.яч}}, M_{\text{б.вор.гор}}, M_{\text{б.вор.с.п}}, M_{\text{б.дер.вор.пш}}, M_{\text{б.дер.вор.гор}}, M_{\text{б.изм.ж}}, M_{\text{б.КК}}$  – массы вороха зерна пшеницы, ячменя и гороха, вороха семян подсолнечника, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти

вороха гороха, измельченного жмыха и комбикорма-концентрата, которые могут находиться в выбранных бункерах соответственно, кг;  $Z_{д.изм.ж}$ ,  $Z_{д.вор.с.п}$ ,  $Z_{д.вор.пш}$ ,  $Z_{д.вор.яч}$ ,  $Z_{д.вор.гор}$ ,  $Z_{д.дер.вор.пш}$ ,  $Z_{д.дер.вор.яч}$ ,  $Z_{д.дер.вор.гор}$ ,  $Z_{д.КК}$  – количество дней, на которое можно заготовить измельченный жмых, ворох зерна пшеницы, ячмень и горох, ворох семян подсолнечника, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти вороха гороха, комбикорм-концентрат соответственно (по объему бункера), сут;  $Z_{д}$  – количество дней обслуживания бункерами поголовья, сут.;  $Z_{д.изм.ж0}$ ,  $Z_{д.вор.с.п0}$ ,  $Z_{д.вор.пш0}$ ,  $Z_{д.вор.яч0}$ ,  $Z_{д.вор.гор0}$ ,  $Z_{д.дер.вор.пш0}$ ,  $Z_{д.дер.вор.яч0}$ ,  $Z_{д.дер.вор.гор0}$ ,  $Z_{д.КК0}$  – количество дней, на которое можно заготовить измельченный жмых, ворох зерна пшеницы, ячмень и горох, ворох семян подсолнечника, дерти вороха пшеницы, дерти вороха ячменя, дерти вороха гороха, комбикорм-концентрат соответственно (по производительности машин), сут;  $T_c$  – время смены, ч ( $T_c = 8$  ч);  $G_{ж}$  – производительность участка подготовки жмыха, кг/ч;  $G_{а.э}$  – эксплуатационная производительность комбикормового агрегата, кг/ч;  $P_{жм}$  – масса измельченного жмыха подсолнечного, приготавливаемого за смену работы участком, кг;  $P_{изм}$  – масса измельченного зерна зерновых компонентов, кг;  $P_{кон}$  – масса комбикормов-концентратов, приготавливаемых за смену работы комбикормовым агрегатом, кг;  $t_{ф.у}$ ,  $t_{ф.а}$  – время активной работы участка приготовления жмыха и комбикормового агрегата за смену, ч;  $t_y$ ,  $t_a$  – время работы участка приготовления жмыха и комбикормового агрегата за смену с учетом вспомогательных мероприятий, ч;  $k_{см}$  – коэффициент использования времени смены участка и комбикормового агрегата ( $k_{см} = 0,8$ );  $t_{ay}$  – время работы рабочих цеха за смену при совместной работе комбикормового агрегата и участка приготовления жмыха, ч;  $\tau_c$  – количество смен работы цеха с одновременной работой участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата, сут;  $T_{у.ж}$ ,  $T_a$  – время работы оборудования участка и комбикормового агрегата в год, ч;  $T_{а.у}$  – время работы по обслуживанию персонала цеха в год при совместной работе комбикормового агрегата и участка подготовки жмыха, ч;  $N_{ч}$  – количество одновременно действующих рабочих в цехе, чел. ( $N_{ч} = 1$  чел.);  $P_{э.а}$ ,  $P_{э.у}$  – годовой расход электроэнергии комбикормовым агрегатом и участком соответственно, кВт;  $N_a$  – суммарная мощность привода машин комбикормового агрегата, кВт;  $N_y$  – суммарная мощность привода машин участка подготовки жмыха, кВт;  $E_a$ ,  $E_y$  – энергозатраты на приготовления комбикормов-концентратов и жмыха соответственно, кВт;  $З_{п}$  – затраты на оплату труда рабочим, руб.;  $C_{ч}$  – тарифная ставка рабочего, руб/ч ( $C_{ч} = 17\ 054$  руб/ч на 01.01.2023 г. в Краснодарском крае);  $B_{су}$ ,  $B_{са}$  – балансовая стоимость оборудования участка и комбикормового агрегата, руб.;  $\Gamma_{э.а}$ ,  $\Gamma_{э.у}$  – годовые эксплуатационные издержки комбикормового агрегата и участка соответственно, руб.;  $c_э$  – цена 1кВт-ч электроэнергии, руб.;  $c_{аа}$ ,  $c_{ay}$  – цена агрегата и участка соответственно, руб.;  $p$ ,  $a$  – проценты отчислений на ремонт и ТО и амортизационных отчислений ( $p = 8\%$ ,  $a = 12,5\%$ ), %;  $\Pi_{py}$ ,  $\Pi_{pa}$  – прочие прямые издержки на участок и комбикормовый агрегат, руб.;  $n$  – процент прочих прямых издержек ( $n = 10\%$ ), %;  $F_{пом.у}$ ,  $F_{пом.а}$  – площадь помещений участка и агрегата, м<sup>2</sup>;  $z_{ay}$ ,  $z_{аа}$  – количество участков и комбикормовых агрегатов в цеху, шт.;  $V_{x.y}$ ,  $V_{x.a}$  – объемы бункеров, которые установлены для участка и комбикормового агрегата соответственно, м<sup>3</sup>;  $З_{пом.у}$ ,  $З_{пом.а}$  – годовые затраты на помещения участка

и агрегата, руб.;  $C_{\text{пом}}$  – величина затрат на эксплуатацию 1 м<sup>2</sup> площади, руб/м<sup>2</sup> ( $C_{\text{пом}} = 149\,902 \text{ руб/м}^2$ )<sup>2</sup>;  $\Pi_{3,y}$ ,  $\Pi_{3,a}$  – приведенные затраты по вариантам участков и агрегатов, руб.

**Результаты исследования.** Разработан алгоритм с учетом математической модели. Данный алгоритм реализован в программе Microsoft Excel 2016. Исходные данные для проведения расчетов приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

**Исходные данные для выбора рационального варианта машин для участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата**

**Initial data for the selection of a rational machinery for the producing sunflower meal on the field plot**

Схема / Scheme	Оборудование / Equipment	Марка / Make	W, т/ч	N, кВт
1	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	КМЗ-2	0,155	40,000
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	СМ-2500G	0,181	2,500
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	КУ-2	1,500	26,650
2	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	ЭК-150	0,075	18,620
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	SP-1000,65	0,500	1,500
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	КМЗ-2	1,600	21,500
3	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	ПЭ-110	0,065	11,370
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	SP-1000,65	0,500	1,500
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	КМЗ-2	1,200	21,500
4	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	ПЭ-180	0,090	18,620
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	ДР-15	0,700	5,500
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	АК-3000	1,800	45,100
5	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	ПЭ-500	0,100	56,100
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	ДР-25	1,000	7,500
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	КМЗ-4	2,400	41,740

<sup>2</sup> Об утверждении стоимости одного квадратного метра общей площади жилья в сельской местности на территории Краснодарского края на 2023 год, используемой для расчета размеров социальных выплат, предоставляемых за счет федерального и краевого бюджетов на строительство (приобретение) жилья гражданам, проживающим на сельских территориях [Электронный ресурс] : Приказ Министерства сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края от 02.03.2023 г. № 89. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2301202303090003?ysclid=1vxuc900qj990668970> (дата обращения: 20.12.2023).

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5
6	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	ПЭ-300	0,150	30,800
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	ДР-2/22	1,800	22,000
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machinery	АКА-3,322	2,400	45,100
7	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	ЭМ-200	0,095	22,962
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	ДРМ-15	0,500	3,000
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	«Алтай»	2,100	30,500
8	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	ПЭ-250	0,150	37,000
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	ДМР-18,5	1,000	18,500
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	АТМ-3	1,800	28,000
9	Экструдер жмыха / Sunflower meal extruder	Гарант-Агро-150	0,075	15,000
	Измельчитель жмыха / Sunflower meal crusher	ДР-25	1,000	7,500
	Транспортер для загрузки измельченного жмыха / Conveyor for loading crushed sunflower meal	ТСШ-100	2,000	1,100
	Комбикормовый агрегат / Compound Feed machine	АК-2-2	3,000	45,100

*Источник:* здесь и далее в статье все таблицы составлены автором.

*Source:* Hereinafter in this article all tables were drawn up by the author.

Под участком подготовки жмыха подразумевается набор машин, в состав которого входят: экструдер для его получения, измельчитель жмыха и транспортер для загрузки его в измельченном виде. Под комбикормовым агрегатом подразумевается серийный агрегат, который приготавливает высококачественный комбикорм. В качестве исходного сырья выступают фуражное зерно (пшеница, рожь, ячмень, овес) и белково-витаминная добавка. В состав агрегата входят машины и оборудование для производства комбикорма.

Технико-экономические показатели и затраты на помещение цеха и его эксплуатацию рассчитаны согласно рекомендациям профессора В. В. Коновалова<sup>3</sup> с учетом полученных выражений для технологического расчета.

Результаты расчета по выбору рационального варианта машин для участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата приведены в таблице 2.

Критерием, по которому происходит выбор рационального варианта участка и комбикормового агрегата, являются технико-экономические показатели, годовые эксплуатационные и прочие прямые издержки, приведенные затраты.

<sup>3</sup> Щербаков С. И., Дмитриев В. Ф., Коновалов В. В. Механизация технологических процессов животноводства : учеб. пособие. Пенза : РИО ПГСХА, 2006. 276 с. EDN: RWHTEZ

Таблица 2  
Table 2

 Результаты технологического расчета участка и комбикормового агрегата  
 Results of technological calculation of the field plot and compound feed machinery

Наименование показателя / The name of the indicator	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Схема 1 / Scheme 1	Схема 2 / Scheme 2	Схема 3 / Scheme 3	Схема 4 / Scheme 4	Схема 5 / Scheme 5	Схема 6 / Scheme 6	Схема 7 / Scheme 7	Схема 8 / Scheme 8	Схема 9 / Scheme 9	Схема 10 / Scheme 10
Производительность участка жмыха ( $G_{ж}$ ), кг/ч / Productivity of the sunflower meal field plot ( $G_{ж}$ ), kg/h	155	75	65	90	100	150	95	75	150	75
Производительность комбикормового агрегата ( $G_{а.с.}$ ), кг/ч / Compound Feed machine productivity ( $G_{а.с.}$ ), kg/h	1 500	1 600	1 200	1 800	2 400	2 400	2 100	600	1 800	3 000
Количество дней, на которое можно заготовить корма, сут. / The number of days for which it is possible to prepare food, d:										
измельченного жмыха ( $Z_{д.т.ж.м.ж.м.}$ ) / crushed sunflower meal ( $Z_{д.т.ж.м.ж.м.}$ )	6	3	2	3	4	6	3	3	6	3
вороха семян подсолнечника ( $Z_{д.вор.с.п.}$ ) / heaps of sunflower seeds ( $Z_{д.вор.с.п.}$ )	5	2	2	3	3	5	3	2	5	2
вороха зерна / heaps of grain:										
пшеницы ( $Z_{д.вор.пш.}$ ) / wheat ( $Z_{д.вор.пш.}$ )	24	25	19	28	38	38	33	9	28	48
ячменя ( $Z_{д.вор.яч.}$ ) / barley ( $Z_{д.вор.яч.}$ )	24	25	19	28	38	38	33	9	28	48
гороха ( $Z_{д.вор.гор.}$ ) / peas ( $Z_{д.вор.гор.}$ )	34	36	27	41	54	54	48	13	41	68
дурты вороха зерна / take away the piles of grain:										
пшеницы ( $Z_{д.д.ер.вор.пш.}$ ) / wheat ( $Z_{д.д.ер.вор.пш.}$ )	60	64	48	72	96	96	84	24	72	120
ячменя ( $Z_{д.д.ер.вор.яч.}$ ) / barley ( $Z_{д.д.ер.вор.яч.}$ )	48	51	38	57	76	76	67	19	57	96
гороха ( $Z_{д.д.ер.вор.гор.}$ ) / peas ( $Z_{д.д.ер.вор.гор.}$ )	92	98	73	110	147	147	129	36	110	184
комбикорма-концентрата ( $Z_{д.к.к.}$ ) / concentrated compound feed ( $Z_{д.к.к.}$ )	7	8	6	9	12	12	10	3	9	15



Продолжение табл. 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Время активной работы участка приготовления жмыха за смену ( $t_{ф,а}$ ), ч / The time of active operation on the field plot for producing sunflower meal per shift ( $t_{ф,а}$ ), h	1,29	2,67	3,08	2,22	2,00	1,33	2,11	2,67	1,33	2,67
Время активной работы комбикормового агрегата за смену ( $t_{ф,а}$ ), ч / The time of active operation of the compound feed machine per shift ( $t_{ф,а}$ ), h	1,03	0,97	1,29	0,86	0,65	0,65	0,74	2,58	0,86	0,52
Время работы участка приготовления жмыха за смену с учетом вспомогательных мероприятий ( $t_y$ ), ч / The working time on the field plot for producing the sunflower meal per shift, taking into account auxiliary measures ( $t_y$ ), h	1,61	3,33	3,85	2,78	2,50	1,67	2,63	3,33	1,67	3,33
Время работы комбикормового агрегата за смену с учетом вспомогательных мероприятий ( $t_y$ ), ч / The working time of the compound feed machine per shift, taking into account auxiliary measures ( $t_y$ ), h	1,29	1,21	1,61	1,08	0,81	0,81	0,92	3,23	1,67	0,65
Время работы персонала цеха за смену при совместной работе комбикормового агрегата и участка подготовки жмыха ( $t_{с,ч}$ ), ч / The working hours of the workshop workers per shift during the joint operation of the compound feed machinery and the field plot for producing sunflower meal ( $t_{с,ч}$ ), h	1,61	3,33	3,85	2,78	2,50	1,67	2,63	3,33	1,67	3,33
Время работы оборудования участка в год ( $T_{ук}$ ), ч / The operating time of the field plot equipment per year ( $T_{ук}$ ), h	471	973	1 123	811	730	487	768	973	487	973

Продолжение табл. 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Время работы оборудования агрегата за год ( $T_a$ ), ч / The operating time of the compound feed machine equipment per year ( $T_a$ ), h	377	354	471	314	236	236	269	943	314	189
Время работы по обслуживанию персонала цеха в год при совместной работе комбикормового агрегата и участка подготовки жмыха ( $T_{a,y}$ ), ч / The time of work for the maintenance of the workshop staff per year during joint operation of the compound feed machinery and the sunflower meal production field plot ( $T_{a,y}$ ), h	589	1 217	1 404	1 014	913	608	961	1 217	608	1 217
Мощность привода машин в комбикормовом агрегате ( $N_a$ ), кВт / The drive power of the compound feed machine system ( $N_a$ ), kW	26,65	21,50	21,50	45,10	41,74	45,10	30,50	13,20	28,00	45,10
Годовой расход эл. энергии агрегатом ( $P_{3a}$ ), кВт·ч / Annual consumption of electric energy by the compound feed machine ( $P_{3a}$ ), kW·h	15 689	26 158	30 183	45 726	38 088	27 436	29 296	16 060	17 033	54 872
Энергозатраты на приготовление комбикормов-концентратов ( $E_a$ ), кВт·ч/кг / Energy consumption for the producing concentrated compound feed ( $E_a$ ), kW·h/kg	0,0277	0,0462	0,0533	0,0808	0,0673	0,0485	0,0518	0,0284	0,0301	0,0970
Суммарная мощность привода машин на участке для приготовления жмыха ( $N_y$ ), кВт / The total drive power of the machines on the field plot for producing sunflower meal ( $N_y$ ), kW	43,60	21,22	13,97	25,22	64,70	53,90	27,06	27,22	56,60	23,60

Продолжение табл. 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Годовой расход эл. энергии участком притопливания жмыха ( $P_{\text{э}}$ ), кВт·ч / Annual consumption of electric energy on the field plot for production sunflower meal ( $P_{\text{э}}$ ), kW·h	20 534	20 654	15 689	20 456	47 231	26 231	20 795	26 494	27 545	22 971
Энергозатраты участка подготовки жмыха ( $E_{\text{э}}$ ), кВт·ч/кг / Energy consumption on the field plot for producing sunflower meal ( $E_{\text{э}}$ ), kW·h/kg	0,2813	0,2829	0,2149	0,2802	0,6470	0,3593	0,2849	0,3629	0,3773	0,3147
Технико-экономические показатели / Technical and economic indicators										
Затраты на оплату труда оператора ( $З_{\text{п}}$ ), руб. / The cost of paying the operator ( $З_{\text{п}}$ ), ruble	21 589001	44 617269	51 481464	37 181057	33 462952	22 308634	35 224160	44 617269	22 308634	44 617269
Балансовая стоимость оборудования ( $E_{\text{б}}$ ), руб. / Book value of the equipment for ( $E_{\text{б}}$ ), ruble:										
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot	1 786730	2 574600	3 022600	4 142600	3 465000	4 480000	1 360800	2 590000	1 892656	9 47520
– комбикормового агрегата / compound feed machine	401 800	637 840	597 800	1 210860	1 005200	18 410000	9 52273	3 99000	11 459000	1 211000
Затраты на ТО и ремонт ( $P_{\text{р}}$ ), руб. / Maintenance and repair costs for ( $P_{\text{р}}$ ), ruble:										
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot	142 938	205 968	241 808	331 408	277 200	358 400	108 864	207 200	151 412	75 802
– комбикормового агрегата / compound feed machine	32 144	51 027	47 824	96 869	80 416	1 472800	76 182	31 920	916 720	96 880
Затраты на амортизацию ( $A_{\text{в}}$ ), руб. / Depreciation costs for ( $A_{\text{в}}$ ), ruble:										
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot	223 341	321 825	377 825	517 825	433 125	560 000	170 100	323 750	236 582	118 440

Продолжение табл. 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
– комбикормового агрегата / compound feed machine	50 225	79 730	74 725	151 358	125 650	2 301 250	119 034	49 875	1 432 375	1 513 75
Годовые затраты на эл. энергию (З <sub>эл</sub> ), руб. / Annual electric energy costs for (З <sub>эл</sub> ), ruble:										
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot	123 205	123 925	94 136	122 737	283 386	157 388	124 770	158 965	165 272	137 824
– комбикормового агрегата / compound feed machine	94 135	156 950	181 096	274 358	228 527	164 615	175 776	96 360	102 200	329 230
Годовые эксплуатационные издержки (Г <sub>3</sub> ), руб. / Annual operating costs for (Г <sub>3</sub> ), ruble:										
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot	22 078 486	45 268 987	52 195 233	38 153 028	34 456 663	23 384 422	35 627 894	45 307 184	22 861 901	44 949 334
– комбикормового агрегата / compound feed machine	21 765 505	44 904 976	51 785 109	37 703 642	33 897 544	26 247 299	35 595 152	44 795 424	24 759 929	45 194 754
Прочие прямые издержки (П <sub>пр</sub> ), руб. / Other direct costs for (П <sub>пр</sub> ), ruble:										
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot	2 207 849	4 526 899	5 219 523	3 815 303	3 445 666	2 338 442	3 562 789	4 530 718	2 286 190	4 494 933
– комбикормового агрегата / compound feed machine	2 176 550	4 490 498	5 178 511	3 770 364	3 389 754	2 624 730	3 559 515	4 479 542	2 475 993	4 519 475
Расчет затрат на помещение цеха и его эксплуатацию / Calculation of costs for workshop premises and its operation										
Габаритные размеры (F <sub>г</sub> ), м <sup>2</sup> / Overall dimensions (F <sub>г</sub> ), m <sup>2</sup> :										
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot	3,43	1,66	2,06	2,01	4,10	3,30	1,80	1,47	3,05	1,52
– комбикормового агрегата / compound feed machine	13,21	5,74	13,21	6,76	10,29	6,41	14,40	0,31	4,50	6,65

Окончание табл. 2 / End of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Потребная площадь помещений (F <sub>нов</sub> ), м <sup>2</sup> / Required area of premises (F <sub>нов</sub> ), м <sup>2</sup> : – участка жмыха / the sunflower meal production field plot – комбикормового агрегата / compound feed machine	11,29 46,28	5,99 23,87	7,18 46,28	7,04 26,94	13,29 37,54	10,91 25,89	6,39 49,87	5,42 7,58	10,14 20,17	5,56 26,62
Годовые затраты на помещения (З <sub>нов</sub> ), руб. / Annual costs (З <sub>нов</sub> ), руб.:	1 691910	897 664	1 076152	1 055025	1 992887	1 636068	958 536	812 184	1 519976	833 365
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot – комбикормового агрегата / compound feed machine	6 937714	3 578411	6 937714	4 037776	5 626821	3 880343	7 475113	1 136619	3 023024	3 989892
Приведенные затраты по вариантам (П <sub>3</sub> ), руб. / The costs for options (П <sub>3</sub> ), ruble:	2 3949069	4 6424111	5 3573646	3 9622313	3 6796050	2 5468490	3 6722510	4 6378368	2 4571143	4 5877452
– участка жмыха / the sunflower meal production field plot – комбикормового агрегата / compound feed machine	2 8743399	4 8547171	5 8782604	4 1862504	3 9624886	3 1968643	4 3165492	4 5971943	2 8928853	4 9305745

На основе ММ проведены расчеты по определению рационального варианта участка и комбикормового агрегата. Рациональным вариантом является схема 1 (табл. 1). Производительность участка и комбикормового агрегата составили 155 и 1500 кг/ч соответственно. Энергозатраты на приготовление комбикормов-концентратов – 0,0277 кВт·ч/кг.

**Обсуждение и заключение.** На основе данных критериев выбран рациональный вариант участка и комбикормового агрегата, которому относится схема 1 (табл. 1). Данный вариант имеет годовые эксплуатационные издержки в размере 22 078 486 и 21 765 505 руб.; прочие прямые издержки – 22 078 49 и 21 765 50 руб.; приведенные затраты по вариантам – 23 949 069 и 28 743 399 руб. соответственно.

Таким образом, на основе разработанного алгоритма и программы для его реализации с учетом математической модели приготовления комбикорма-концентрата проведен технологический расчет участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата, а также рассчитаны их технико-экономические показатели и затраты на помещение цеха и его эксплуатацию, выбран рациональный вариант участка и комбикормового агрегата. Экономический эффект выбранного участка подготовки жмыха и комбикормового агрегата получен за счет снижения годовых эксплуатационных и прочих прямых издержек приведенных затрат.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишуров Н. П. Рекомендуемые технологии производства комбикормов в хозяйствах // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2015. № 4 (20). С. 6–14. EDN: VBWKEV
2. Чупшев А. В. Обоснование перспективной операционной схемы приготовления комбикормов-концентратов в условиях животноводческих предприятий // Нива Поволжья. 2021. № 3(60). С. 135–141. <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.022>
3. Совершенствование технологии кормления высокопродуктивных коров / С. Винницки [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 3 (35). С. 147–151. EDN: TJRZPE
4. Коновалов В. В., Терюшков В. П., Петрова С. С. Моделирование молочной продуктивности коров при изменении технологических процессов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1. С. 27–34. EDN: EWXXCB
5. Валге А. М., Перекопский А. Н. Математическая модель структуры кормов молочного стада КРС с использованием плющеного зерна // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 49. С. 286–291. EDN: YOKBAS
6. Варакин С. В., Доценко С. М., Крючкова Л. Г. Экономико-математическая модель оценки инновационной технологии приготовления кормовых продуктов на основе соево-зерновых композиций // АгроЭкоИнфо. 2018. № 1 (31) С. 47. EDN: XSUWAX
7. Научно-технические аспекты разработки системы и устройств для производства инновационных продуктов на основе соево-растительных композиций / С. М. Доценко [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2017. № 1 (64). С. 16–20. EDN: YHSTSD
8. Модель приготовления кормов в условиях малых форм хозяйствования / С. Ю. Булатов [и др.] // Техника и оборудование для села. 2023. № 4 (310). С. 26–30. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-4-26-30>



9. Павлидис В. Д., Чкалова М. В., Шахов В. А. Стохастическое моделирование технологического процесса производства комбинированных кормов // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36, № 10. С. 78–83. EDN: ATKVMK
10. Design and Development of Monitoring Device for Corn Grain Cleaning Loss Based on Piezoelectric Effect / W. Yanhan [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 179. Article no. 105793. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105793>
11. Modelling the Quality of the Mixture in a Continuous Paddle Mixer / A. A. H. Al-Maidi [et al.] // *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 2021. Vol. 16. P. 1769–1774. EDN: NIZZWM
12. Airflow Simulation and Inlet Pressure Profile Optimization of a Grain Storage Bin Aeration System / M. O. Binelo [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 164. Article no. 104923. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104923>
13. Chkalova M., Pavlidis V. Assessment of Equipment Efficiency in Models of Technological Processes for Production of Combined Feed // *Engineering for Rural Development*. 2021. Vol. 20. P. 843–848. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF193>
14. Muangpratoom P. The Effect of Temperature on the Electrical Characteristics of Nanofluids Based on Palm Oil // *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2021. Vol. 53, Issue 3. Article no. 210312. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.3.12>
15. Математическая модель оценки качества процесса получения увлажненно-обогащенного зернового сырья / А. В. Бурмага [и др.] // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 4 (52). С. 1–9. <https://doi.org/10.51419/202124413>
16. Крупенин П. Ю. Математическая модель движения кормовой суспензии в каналах роторного импульсного аппарата // *Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2018. № 6. С. 96–103. EDN: XRSMNN
17. Керимов М. А., Иванов Д. В. Биоэнергетическая модель растительного сырья и оценка технологий производства кормов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. № 1. С. 51–61. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61>
18. Development of a Mathematical Model of the Process of Mixing Liquid Feed in an Experimental Setup and Optimization of Design Parameters / P. Solonshchikov [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 420. P. 10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342009002>
19. Study of the Mixing Process With a Paddle Mixer for Cattle / R. Kisilyov [et al.] // *National Inter-agency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*. 2022. № 52. P. 66–72. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.66-72>
20. Bekele G. Development of Livestock Feed Mixer // *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2020. Vol. 10, Issue 10. P. 481–486. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.10.2020.p10665>
21. Analysis of the Influence of Rod Elements on the Mixing Process of Two Components in a Twin-Shaft Paddle Mixer / S. I. Khanin [et al.] // *Digital Technologies in Construction Engineering*. 2022. Vol. 173. P. 175–182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_23)
22. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical Study on Particle Mixing in a Double-Screw Conical Mixer // *Powder Technology*. 2019. Vol. 352. P. 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.065>
23. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System / J. Roh [et al.] // *Computer Aided Chemical Engineering*. 2019. Vol. 46. P. 799–804. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50134-X>
24. Исследование влияния щелевых отверстий в лопастях горизонтального лопастного смесителя на качество подготовки двухкомпонентной сухой смеси / Е. Г. Ханина [и др.] // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2023. Т. 8, № 6. С. 85–93. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93>
25. Analysis of the Influence of Rod Elements on the Mixing Process of Two Components in a Twin-Shaft Paddle Mixer / S. I. Khanin [et al.] // *Digital Technologies in Construction Engineering*. 2021. P. 175–182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_23)

26. Valigi M. C. Model-Based Method Predicting Useful Life of Concrete Mixers // *Plant Precast Technol.* 2020. Vol. 71, Issue 11. P. 38–42. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84887012955&partnerID=MN8TOARS> (дата обращения: 20.12.2023).
27. Theoretical Studies of the Interaction between Screw Surface and Material in the Mixer / A. Marczuk [et al.] // *Materials.* 2021. Vol. 14. P. 962. <https://doi.org/10.3390/ma14040962>
28. Discrete Element Method Study of Effects of the Impeller Configuration and Operating Conditions on Particle Mixing in a Cylindrical Mixer / Y. Bao [et al.] // *Particuology.* 2020. Vol. 49. P. 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.02.002>
29. Okereke C. J., Lasode O. A., Ohijeagbon I. O. Exergoeconomic Analysis of an Industrial Beverage Mixer System // *Heliyon.* 2020. Vol. 6, Issue 7. Article no. e04402. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04402>
30. Исследование и моделирование информационно-управляющей системы при производстве комбикорма на базе интегрированной платы / Н. А. Киктев [и др.] // *Инновации в сельском хозяйстве.* 2020. № 2 (35). С. 51–61. EDN: WOQLMX

## REFERENCES

1. Mishurov N.P. Recommended Technologies of Combined Feed's Production In Farms. *Journal of VNIIMZH.* 2015;(4):6–14. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VBWKEV
2. Chupshev A.V. Justification of the Prospective Operational Scheme Preparation of Mixed Fodder Concentrates in the Conditions of Livestock Enterprises. *Volga Region Farmland.* 2021;(3):135–141. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36461/NP.2021.60.3.022>
3. Vinnitsky S., Romanyuk V., Savinykh P.A., Skorkin V.K. Improvement of High-Production Cows' Feeding Technology. *Journal of VNIIMZH.* 2019;(3):147–151. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TJRZPE
4. Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Petrova S.S. Modeling Milk Yield of Cattle Breed When Changing Technological Processes. *Bulletin Samara State Agricultural Academy.* 2021;(1):27–34. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EWXXCB
5. Valge A.M., Perepopsky A.N. [A Mathematical Model of the Feed Structure of a Dairy Cattle Herd Using Flattened Grain]. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University.* 2017;(49):286–291. (In Russ.) EDN: YOKBAS
6. Varaksin S.V., Dotsenko S.M., Kryuchkova L.G. [An Economic and Mathematical Model for Evaluating Innovative Technology for the Preparation of Feed Products Based on Soy-Grain Compositions]. *AgroEcoInfo.* 2018;(1):47. (In Russ.) EDN: XSUWAX
7. Dotsenko S.M., Burmaga A.V., Goncharuk O.V., Ivanin A.G., Vinokourov S.A. Scientific and Technical Aspects of Systems and Devices for Innovative Products on the Basis of Soy and Vegetable Compositions. *Bulletin of ESSTUM.* 2017;(1):16–20. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YHSTSD
8. Bulatov S.Yu., Zykin A.A., Nechaev V.N., Sergeev A.G., Shamin A.E. Model of Feed Preparation in the Conditions of Small Farms. *Machinery and Equipment for Rural Area.* 2023;(4):26–30. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-4-26-30>
9. Pavlidis V.D., Chkalova M.V., Shakhov V.A. Stochastic Modelling of the Technological Process to Produce Combined Feed. *Achievements of Science and Technology of AICis.* 2022;36(10):78–83. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ATKVMK
10. Yanhan W., Xiaoyu L., Enrong M., Yuefeng D., Fan Y. Design and Development of Monitoring Device for Corn Grain Cleaning Loss Based on Piezoelectric Effect. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2020;179:105793. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105793>
11. Al-Maidi A.A.H., Himoud M.S., Kaliganov A.C., Teryushkov V.P., Chupshev A.V., Konovalov V.V., et al. Modelling the Quality of the Mixture in a Continuous Paddle Mixer. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences.* 2021;16:1769–1774. EDN: NIZZWM

12. Manuel O.B., Vanessa F., Oleg A.K., Bulat Z. Airflow Simulation and Inlet Pressure Profile Optimization of a Grain Storage Bin Aeration System. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;164:104923. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104923>
13. Chkalova M., Pavlidis V. Assessment of Equipment Efficiency in Models of Technological Processes for Production of Combined Feed. *Engineering for Rural Development*. 2021;20:843–848. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF193>
14. Muangpratoom P. The Effect of Temperature on the Electrical Characteristics of Nanofluids Based on Palm Oil. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2021;53(3):210312. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.3.12>
15. Burmaga A.V., Kurkov Yu.B., Samuilo V.V., Panova E.V., Chubenko A.V., Vinokurov S.A. [Mathematical Model for Assessing the Quality of the Process Producing Moistened-Enriched Grain Raw Materials]. *AgroEcoInfo*. 2022;(4):1–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/202124413>
16. Krupenin P.Y. The Mathematical Model of Feed Suspension Movement in the Channels of Rotary Impulse Device. *BarSU Herald*. 2018;(6):96–103. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XRSMNN
17. Kerimov M.A., Ivanov D.V. Bioenergy Model of Plant Raw Materials and Assessment of Feed Production Technologies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):51–61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61>
18. Solonshchikov P., Savinykh P., Aleshkin A., Kipriyanov F. Development of a Mathematical Model of the Process of Mixing Liquid Feed in an Experimental Setup and Optimization of Design Parameters. *E3S Web of Conferences*. 2023;420:10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342009002>
19. Kisilyov R., Luzan P., Bohatyrov D., Nesterenko O. Study of the Mixing Process With a Paddle Mixer for Cattle. National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*. 2022;52:66–72. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.66-72>
20. Bekele G. Development of Livestock Feed Mixer. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2020;10(10):481–486. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.10.2020.p10665>
21. Khanin S.I., Kikin N.O., Zybin R.V., Khanina E.G. Analysis of the Influence of Rod Elements on the Mixing Process of Two Components in a Twin-Shaft Paddle Mixer. *Digital Technologies in Construction Engineering*. 2022;173:175–182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_23)
22. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical Study on Particle Mixing in a Double-Screw Conical Mixer. *Powder Technology*. 2019. Vol;352:193–208. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.065>
23. Roh J., Kim J., Lee M.S., Moon I. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2019;46:799–804. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50134-X>
24. Investigation of Influence of Slotted Holes in Blades of Horizontal Blade Mixer on Quality of Preparation of Two-Component Dry Mixture. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2023;8(6):85–93. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93>
25. Khanin S.I., Kikin N.O., Zybin R.V., Khanina E.G. Analysis of the Influence of Rod Elements on the Mixing Process of Two Components in a Twin-Shaft Paddle Mixer. *Digital Technologies in Construction Engineering*. 2021:175–182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_23)
26. Valigi M.C. Model-Based Method Predicting Useful Life of Concrete Mixers // Plant Pre-cast Technol. 2020;71(11):38–42. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84887012955&partnerID=MN8TOARS> (accessed 20.12.2023).
27. Marczuk A., Sysuev V., Aleshkin A., Savinykh P., Turbanov N., Tomporowski A. Theoretical Studies of the Interaction between Screw Surface and Material in the Mixer. *Materials*. 2021;14:962. <https://doi.org/10.3390/ma14040962>
28. Bao Y., Li T., Wang D., Cai Z., Gao Z. Discrete Element Method Study of Effects of the Impeller Configuration and Operating Conditions on Particle Mixing in a Cylindrical Mixer. *Particuology*. 2020;49:146–158. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.02.002>

29. Okereke C.J., Lasode O.A., Ohijeagbon I.O. Exergoeconomic Analysis of an Industrial Beverage Mixer System. *Heliyon*. 2020;6(7):e04402. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04402>

30. Kiktev N.A., Miroshnyk V.A., Lendiel T.I., Ivanenko V.I. Arduino Research and Modeling of the Information and Management System in the Production of Combicor on the Arduino Integrated Basis. *Innovation in Agriculture*. 2020;(2):51–61. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WOQLMX

*Об авторе:*

**Припоров Игорь Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры тракторов, автомобилей и технической механики Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8201-2819>, Researcher ID: N-4901-2016, [i.priporov@yandex.ru](mailto:i.priporov@yandex.ru)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 26.01.2024; поступила после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 01.03.2024*

*About the author:*

**Igor E. Priporov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Tractors, Automobiles and Technical Mechanics, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8201-2819>, Researcher ID: N-4901-2016, [i.priporov@yandex.ru](mailto:i.priporov@yandex.ru)

*The author has read and approved the final manuscript.*

*Submitted 26.01.2024; revised 08.02.2024; accepted 01.03.2024*

# АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

Оригинальная статья / Original article

УДК 631.316.022

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402.213-228



## Обоснование оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора по тяговому сопротивлению

И. В. Божко<sup>1</sup>✉, С. И. Камбулов<sup>1,2</sup>, Г. Г. Пархоменко<sup>1</sup>,  
В. Б. Рыков<sup>1,2</sup>, Д. С. Подлесный<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Аграрный научный центр «Донской»  
(г. Зерноград, Российская Федерация)*

<sup>2</sup> *Донской государственный технический университет  
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)*

✉ [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Технологическая операция обработки почвы является энергоемким процессом. Непосредственное влияние на показатель энергозатрат оказывает тяговое сопротивление почвообрабатывающих агрегатов. В связи с этим актуальной является задача разработки конструкции рабочего органа парового культиватора, обеспечивающего снижение тягового сопротивления.

**Цель исследования.** Поиск оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора путем определения тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось в полевых условиях на опытной установке с применением метода полного факторного эксперимента с рабочей моделью, основанной на трехуровневом плане.

**Результаты исследования.** Посредством регрессионного анализа экспериментальных данных была получена математическая модель, позволяющая определить оптимальные параметры функционирования рабочего органа парового культиватора при выполнении технологической операции обработки почвы.

**Обсуждение и заключение.** В ходе расчетов было установлено, что наименьшее тяговое сопротивление  $P_T = 0,72$  кН, создаваемое рабочим органом, достигается при следующих значениях: глубина обработки почвы  $h = 4$  см; угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев  $f = 0^\circ$ ; скорость движения агрегата  $v = 2,61$  м/с. В качестве оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора, определенных при помощи полученной математической модели, угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рекомендуется принять как  $f = 0^\circ$ , а скорость движения агрегата как  $v = 2,91$  м/с. Также, учитывая рекомендуемые оптимальные параметры рабочего органа, возможно рассчитать значение показателя тягового сопротивления при различной глубине обработки почвы. Тяговое сопротивление будет изменяться в пределах 0,79–1,81 кН при глубине обработки почвы от 4 до 12 см.

© Божко И. В., Камбулов С. И., Пархоменко Г. Г., Рыков В. Б., Подлесный Д. С., 2024



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

Полученная математическая модель тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом, позволит более точно подходить к вопросу проектирования сельскохозяйственных машин.

**Ключевые слова:** параметры функционирования, тяговое сопротивление, паровой культиватор, математическая модель, регрессионный анализ

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках госбюджетной НИР.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

**Для цитирования:** Обоснование оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора по тяговому сопротивлению / И. В. Божко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 213–228. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.213-228>

## Justification of Optimal Operating Parameters of the Field Cultivator Tool through Determining Traction Resistance

I. V. Bozhko<sup>a</sup>✉, S. I. Kambulov<sup>a,b</sup>, G. G. Parkhomenko<sup>a</sup>,  
V. B. Rykov<sup>a,b</sup>, D. S. Podlesny<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Agrarian Research Center Donskoy  
(Zernograd, Russian Federation)

<sup>b</sup> Don State Technical University  
(Rostov-on-Don, Russian Federation)

✉ [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The technological operation of soil tillage is an energy-intensive preparatory operation. The traction resistance of tillage units has a direct impact on this indicator.

**Aim of the Study.** The study is aimed at searching optimal operating parameters for the field cultivator tool through determining the traction resistance created by this tool.

**Materials and Methods.** The study was carried out in the field on an experimental facility using a full factorial experiment technique with a working model based on a three-level design.

**Results.** Through the regression analysis of experimental data, there was obtained a mathematical model that allows determining the optimal operating parameters for the field cultivator tool when performing a technological operation of soil tillage.

**Discussion and Conclusion.** While calculating, it was found that the lowest traction resistance  $P_T = 0,72$  kN created by the tool is for the following values: tillage depth  $h = 4$  cm, crumbling angle of the left-hand and right-hand flat-cutting wings  $f = 0^\circ$  and the speed of the tillage unit  $v = 2,61$  m/s. As the optimal operating parameters for a field cultivator tool, determined using the obtained mathematical model, it is recommended to use the crumbling angle of the left-hand and right-hand flat-cutting wings of the working body  $f = 0^\circ$ , and the speed of the tillage unit  $v = 2,91$  m/s. Taking into account the recommended optimal operating parameters of the tool, it is possible to calculate the value of the traction resistance index at different tillage depths. The traction resistance will change within the range of 0.79–1.81 kN, when the soil tillage depth changes from 4 to 12 cm. The resulting mathematical model of the traction resistance created by the tool will allow a more accurate approach to the issue of designing agricultural machines.





**Keywords:** optimal operating parameters, traction resistance, field cultivator tool, mathematical model, regression analysis

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

**Funding:** The study was carried out as part of the state budget research.

**Acknowledgements:** The authors would like to thank anonymous reviewers.

**For citation:** Bozhko I.V., Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Rykov V.B., Podlesny D.S. Justification of Optimal Operating Parameters of the Field Cultivator Tool through Determining Traction Resistance. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):213–228. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.213-228>

**Введение.** При проектировании рабочих органов сельскохозяйственных машин одной из основных величин является тяговое сопротивление, создаваемое при различных параметрах и режимах функционирования агрегата. Тяговое сопротивление машин для обработки почвы представляет собой числовое значение затрат энергии трактора на выполнение данной технологической операции.

На энергопотребление и качество выполняемых операций напрямую влияет устойчивость почвы к деформации. С одной стороны, параметрами, влияющими на сопротивление деформации почвы, являются ее механические и структурные характеристики (влажность, твердость, плотность), с другой – это геометрические параметры рабочих органов (форма и качество рабочих поверхностей), а также вес агрегата.

Современные сельскохозяйственные агрегаты для сплошной обработки почвы, выпускаемые серийно, оснащаются рабочими органами в виде стрелчатых лап. Такой тип обладает рядом недостатков, среди которых отсутствие возможности обработки почвы на небольшую глубину (4–6 см) без выноса почвенной влаги на поверхность. Небольшая ширина захвата рабочих органов ведет к увеличению их количества, что повышает металлоемкость и энергозатраты, необходимые для осуществления технологической операции обработки почвы.

В связи с этим работа, направленная на создание конструкции рабочего органа культиватора, имеющего функцию выполнения обработки почвы на глубину 4–6 см без выноса влаги из почвенных слоев на поверхность и обеспечивающего снижение тягового сопротивления, своевременна и актуальна.

**Обзор литературы.** В настоящее время изучению вопроса энергетических затрат при выполнении технологической операции обработки почвы уделяется большое внимание, и процесс этот достаточно полно изучен. Так, в исследовании Е. В. Припорова приведены энергетические показатели работы культиватора в зависимости от размещения рабочих органов на раме в продольном и поперечном направлении [1]. Ученые Омского аграрного университета при выявлении конструктивных недостатков рабочих органов культиваторов установили, что основной причиной некачественной работы агрегата является образование борозд и гребней вследствие разброса почвы по сторонам и ее сгуживания, а также из-за залипания рабочих органов. В результате ими предложена конструкция рабочего органа для сплошной обработки почвы, решающая данную проблему [2].

Современные экспериментальные исследования направлены на создание рабочих органов с регулируемыми параметрами. Например, П. Г. Свечниковым установлено, что затраты энергии на раскалывание и разрезание почвенного пласта рабочими органами связаны с изменением угла крошения, задаваемого во время проектирования конструкции рабочих органов [3]. В исследовании С. И. Старовойтова в рамках этой же проблемы предложена конструкция стрелчатой лапы с возможностью изменения угла резания почвы, а также выражение для определения горизонтальной составляющей тягового сопротивления [4].

Также на данном этапе развития вопроса ученые рассматривают зависимости удельных затрат энергии от скорости движения и глубины обработки почвы комбинированным культиватором. Доказано, что показатель тягового сопротивления растет с увеличением глубины обработки почвы [5].

С целью разработки энергоэффективных почвообрабатывающих рабочих органов приведена классификация условий их функционирования и обоснованы рациональные конструктивные параметры [6]. Рассчитаны дифференциальные уравнения, учитывающие расположение рабочих органов на раме агрегата, и возмущения, возникающие вследствие неровностей поверхности поля и неравномерности энергетических характеристик рабочих органов [7].

В ходе опытов с использованием компьютерной модели деформации почвы получены характеристики процессов взаимодействия рабочих органов сельскохозяйственных машин с почвой [8]. С применением компьютерного моделирования изучены различные типы конструкций рабочих органов культиваторов и их взаимодействие с разными типами почв [9–11]. Установлено, что обработка почвы паровых полей, особенно в засушливый период [12], позволяет накапливать больше влаги [13] в почвенных слоях и получать более высокие урожаи зерновых культур [14; 15].

Интерес ученых вызывает оптимизация параметров и режимов функционирования почвообрабатывающих агрегатов с применением цифровых технологий. Так, Г. Г. Маслов, Е. М. Юдина и И. А. Журий представили алгоритм оптимальных режимов и параметров работы стернового культиватора в виде блок-схемы [16]. В настоящее время ведется изучение и разработка культиваторов различной ширины захвата для сплошной обработки почвы с применением теории случайных колебаний [17].

С использованием методики многофакторного эксперимента исследуется влияние удельного вертикального и горизонтального тягового сопротивления сельскохозяйственных машин и коэффициент тягового усилия в зависимости от глубины обработки и скорости движения [18]. Кроме того, предлагается многометодный алгоритм определения энергетических затрат почвообрабатывающих машин без учета массы рамы и вспомогательных элементов агрегата (опорных колес и др.) [19].

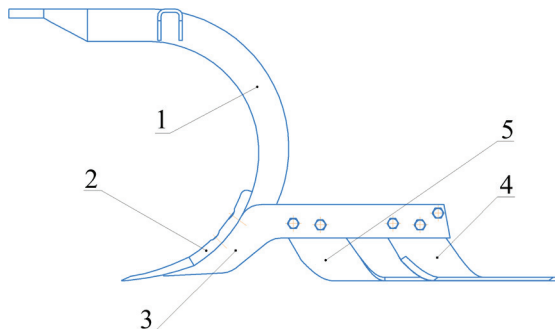
Отмечается, что при определении тягового сопротивления культиваторов-плоскорезов на долю стоек приходится 30–45 % общих затрат энергии<sup>1</sup>.

Таким образом, технологический процесс обработки почвы паровых полей, выполняемый рабочими органами культиватора, является важной операцией,

<sup>1</sup> Камбулов С. И. Механико-технологические основы повышения уровня функционирования сельскохозяйственных агрегатов : моногр. Ростов-на-Дону : Терра Принт, 2006. 304 с. EDN: RVPRIL

оказывающей непосредственное влияние на энергоёмкость и производительность сельскохозяйственной техники. Параметры рабочих органов нуждаются в оптимизации, чему посвящено настоящее исследование.

**Материалы и методы.** В Аграрном научном центре «Донской» разработан рабочий орган парового культиватора для сплошной обработки почвы (рис. 1 и 2).



Р и с. 1. Рабочий орган парового культиватора для сплошной обработки почвы:  
1 – стойка рабочего органа; 2 – долотообразный нож; 3 – съемный держатель;  
4 – левостороннее плоскорежущее крыло; 5 – правостороннее плоскорежущее крыло

F i g. 1. A field cultivator tool for continuous tillage:  
1 – rack of the working body; 2 – chisel-shaped knife; 3 – removable holder;  
4 – left-side flat-cutting wing; 5 – right-hand flat-cutting wing

*Источник:* схема составлена авторами статьи.

*Source:* the diagram was drawn up by the authors of the article.



Р и с. 2. Рабочий орган парового культиватора для сплошной обработки почвы.  
Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

F i g. 2. Field cultivator tool for continuous soil tillage.  
The photo by I. V. Bozhko, 2023

Конструкция рабочего органа парового культиватора выполнена с возможностью регулировки угла крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев в диапазоне 0–10° для установления оптимальных параметров его функционирования.

Методика экспериментальных исследований по определению тягового сопротивления основана на планировании полного факторного эксперимента<sup>2</sup>. В качестве рабочей модели был выбран трехуровневый план Бокса – Бенкина<sup>3</sup>. На данном этапе экспериментальных исследований были приняты параметры: глубина обработки почвы рабочим органом, угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа, скорость движения агрегата.

Исследования проводились в полевых условиях на экспериментальной установке. В качестве измерительного оборудования использовалась многоканальная тензометрическая система ZET 058 (рис. 3) производства Зеленоградской электротехнической лаборатории и тензодатчик силы растяжения и сжатия ТЕНЗО-М С2Н-2-С3 (рис. 4), установленный в шарнирном механизме экспериментальной установки по тяговой линии (рис. 3 и 4).



Р и с. 3. Многоканальная тензометрическая система ZET 058. Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

Fig. 3. Multichannel strain gauge system ZET 058. The photo by I. V. Bozhko, 2023



Р и с. 4. Тензодатчик силы растяжения и сжатия ТЕНЗО-М С2Н-2-С3. Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

Fig. 4. Strain gauge of tensile and compression force TENZO-M S2N-2-S3. The photo by I. V. Bozhko, 2023

Для обработки полученных данных использовалось программное обеспечение ZETLab, среда графического программирования SCADA ZETView, программа для проведения исследований показателей тягового сопротивления, разработанная посредством применения среды графического программирования SCADA ZETView, Microsoft Excel и STATISTICA.

<sup>2</sup> Доспехов Б. А. Методика полевого опыта : учебник для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений по агрономическим специальностям. Изд. 6-е, стер. М. : Альянс, 2011. 350 с.

<sup>3</sup> Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий : моногр. М. : Наука, 1976. 280 с. EDN: TOBZDM



Согласно плану эксперимента, на опытной установке определялась глубина обработки почвы, на рабочем органе устанавливался угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев, а на мобильном энергосредстве (МЭС) задавалась скорость движения агрегата. В качестве МЭС использовался трактор TERRION ATM 3180M 3-го класса тяги агрегатируемый с экспериментальной установкой (рис. 5).



Р и с. 5. Трактор TERRION ATM 3180M в агрегате с экспериментальной установкой.  
Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

F i g. 5. Tractor TERRION ATM 3180 in a unit with an experimental facility.  
The photo by I. V. Bozhko, 2023

На паровом поле размечены экспериментальные участки для проведения исследований по определению тягового сопротивления рабочего органа парового культиватора. Каждый участок разделили на три части: 20 м – для выхода на устойчивый режим работы трактора и его разворота, 50 м – экспериментальный участок, на котором производилась фиксация показателей тензодатчика. Фиксация показателей производилась в трех повторностях при различных параметрах, задаваемых на экспериментальной установке, рабочем органе и мобильном энергосредстве. Обозначения факторов представим в виде таблицы 1.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Обозначения факторов**  
**Factors Designation**

Наименование фактора и обозначения / Factor name and designation	Кодированное обозначение фактора / Coded factor designation	Уровни варьирования / Variation levels			Интервал варьирования фактора / Factor variation interval
		-1	0	+1	
Глубина обработки почвы рабочим органом $h$ , см / Depth of tillage with working body $h$ , cm	$X_1$	4	6	8	2
Угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев $f$ , град. / Angle of crumbling of left-hand and right-hand flat-cutting wings $f$ , deg.	$X_2$	0	5	10	5
Скорость движения агрегата $v$ , м/с / Unit movement speed $v$ , m/s	$X_3$	2,21	2,91	3,61	0,70

*Источник:* здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.  
*Source:* hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

В соответствии с рабочей моделью и трехуровневым планом экспериментальных исследований перед началом эксперимента значения факторов были приведены к безразмерным величинам (кодировались).

**Результаты исследования.** В результате проведения исследований получены числовые значения тягового сопротивления создаваемого рабочим органом парового культиватора. Значения тягового сопротивления в зависимости от выбранных факторов представим в виде таблицы 2.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Матрица планирования эксперимента и результаты исследований**  
**Experiment planning matrix and research results**

№ опыта / Experience no.	Значения факторов в закодированном виде / Factor values in an encoded form			Значения факторов в натуральном виде / Factor values in a natural form			Тяговое сопротивление, $P_T$ , кН / Traction resistance, $P_T$ , kN
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$h$ , см / $h$ , cm	$f$ , град. / $f$ , deg.	$v$ , м/с / $v$ , m/s	
1	+1	+1	0	8	10	2,91	2,01
2	-1	0	+1	4	5	3,61	1,83
3	-1	0	-1	4	5	2,21	1,45
4	0	0	0	6	5	2,91	1,31
5	-1	+1	0	4	10	2,91	0,98
6	0	+1	-1	6	10	2,21	1,71
7	0	-1	+1	6	0	3,61	1,38
8	-1	-1	0	4	0	2,91	0,73
9	0	0	0	6	5	2,91	1,32
10	+1	0	+1	8	5	3,61	1,94
11	+1	0	-1	8	5	2,21	1,83
12	0	0	0	6	5	2,91	1,33
13	0	-1	-1	6	0	2,21	0,80
14	+1	-1	0	8	0	2,91	1,11
15	0	+1	+1	6	10	3,61	1,99



Выражение математической модели с учетом взаимодействия факторов запишем в виде полинома второй степени:

$$y = b_0X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2. \quad (1)$$

Дальнейшая обработка результатов исследований заключается в определении значимости коэффициентов математической модели. Для этого воспользуемся критерием Стьюдента при 5-процентном уровне значимости.

Результаты расчетов значений коэффициентов математической модели и проверки их значимости представим в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

Table 3

**Результаты расчетов значений коэффициентов математической модели и проверки их значимости по критерию Стьюдента**  
**Results of calculating the values of the coefficients of the mathematical model and checking their significance using the Student's test**

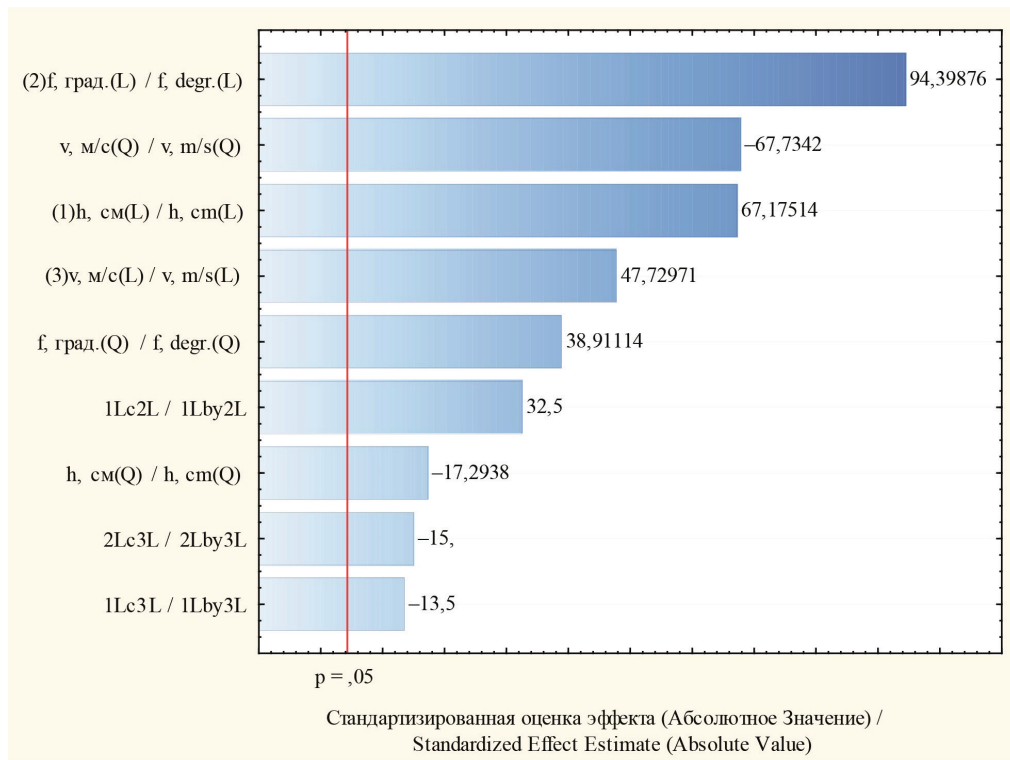
Коэффициент математической модели / Mathematical model coefficient	Значение коэффициента математической модели в закодированном виде / Mathematical model coefficient value in encoded form	Расчитанное значение по критерию Стьюдента, $t$ / Calculated value based on criterion Student's test, $t$	Табличное значение по критерию Стьюдента, $t_{кр}$ / Tabular value by Student's criterion, $t_{cr}$
$b_0$	1,4800	512,6870	
$b_1$	0,2375	67,1751	
$b_{11}$	-0,0450	-17,2938	
$b_2$	0,3337	94,3988	
$b_{22}$	0,1012	38,9111	
$b_3$	0,1687	47,7297	2,16
$b_{33}$	-0,1762	-67,7342	
$b_{12}$	0,1625	32,5000	
$b_{13}$	-0,0675	-13,5000	
$b_{23}$	-0,0750	-15,0000	

Анализ данных рассчитанных значений показал, что все коэффициенты в рассматриваемой математической модели являются значимыми, так как они больше табличного (критическое значение – квантиль). Число значимых коэффициентов при этом равно 9.

Для более полного анализа представим данные таблицы 3 в виде гистограммы Парето (рис. 6).

Как видно из гистограммы Парето, наиболее значимым фактором, оказывающим воздействие на создаваемое рабочим органом парового культиватора тяговое сопротивление, является фактор угла крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев. Математическая модель в закодированном виде будет выглядеть следующим образом:

$$y = 1,4800 + 0,2375X_1 + 0,3337X_2 + 0,1687X_3 + 0,1625X_{12} - 0,0675X_{13} - 0,0750X_{23} - 0,450X_1^2 + 0,1012X_2^2 - 0,1762X_3^2. \quad (2)$$



Р и с. 6. Гистограмма Парето

F i g. 6. Pareto histogram

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Для оценки значимости полученной математической модели используем статистический критерий Фишера (*F*-критерий).

Расчеты декодированных значений коэффициентов математической модели представим в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Декодированные значения коэффициентов математической модели  
Decoded values of the mathematical model coefficients

Коэффициент математической модели / Mathematical model coefficient	Декодированные значения коэффициентов математической модели / Decoded value of the mathematical model coefficients	Дисперсия / Dispersion
1	2	3
$b_0$	5,6054	
$b_1$	-0,0922	0,4512
$b_{11}$	0,0225	0,0299
$b_2$	0,1126	0,8911

Окончание табл. 4 / End of table 4

1	2	3
$b_{22}$	-0,0081	0,1514
$b_3$	-3,5493	0,2278
$b_{33}$	0,7193	0,4587
$b_{12}$	0,0162	0,1056
$b_{13}$	-0,0482	0,0182
$b_{23}$	-0,0214	0,0225
$S_{ад.}^2$		0,0466
$S_{воспр.}^2$		0,0001
$F_{расч.}$		466
$F_{табл.05}$		3,59
$R^2$		0,94468

Анализ полученных данных показывает, что все рассматриваемые факторы, принятые в экспериментальном исследовании оказывают значимое влияние на тяговое сопротивление, так как рассчитанные значения критерия Фишера больше табличного (критического) значения. По коэффициенту детерминации  $R^2 = 0,94468$  математическая модель достаточно полно описывает изменение показателей тягового сопротивления с учетом изучаемых факторов.

Математическая модель в декодированном виде будет выглядеть следующим образом:

$$P_T = 5,6054 - 0,0922h + 0,1126f - 3,5493v + 0,0162hf - 0,0482hv - 0,0214fv + 0,0225h^2 - 0,0081f^2 + 0,7193v^2, \quad (3)$$

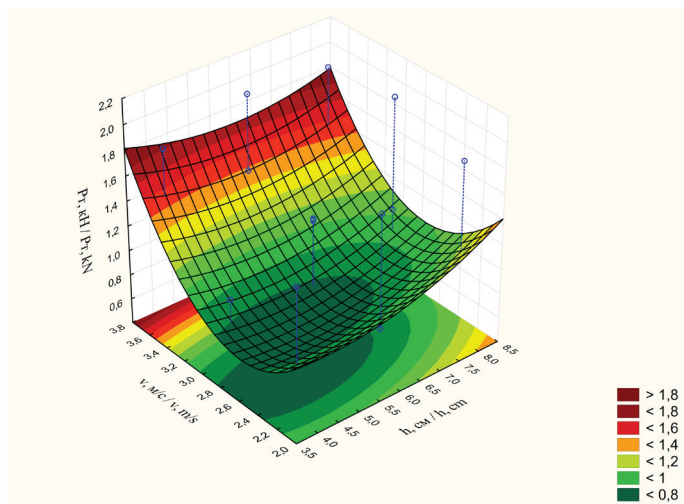
где  $P_T$  – тяговое сопротивление, кН;  $h$  – глубина обработки почвы, см;  $f$  – угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа, град.;  $v$  – скорость движения агрегата, м/с.

Согласно полученной математической модели, наименьшие показатели тягового сопротивления  $P_T = 0,72$  кН достигаются при глубине обработки почвы  $h = 4$  см, угле крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа  $f = 0^\circ$  и скорости движения агрегата  $v = 2,6$  м/с. Угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа рекомендуется принять как  $f = 0^\circ$ , а скорость движения агрегата – как  $v = 2,91$  м/с.

Полученную математическую модель представим в виде графика трехмерной поверхности отклика (рис. 7).

Для построения графика угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа  $f$  фиксировался на уровне рекомендуемых параметров ( $0^\circ$ ).

Учитывая предлагаемые оптимальные параметры рабочего органа, по полученной математической модели можно рассчитать значение показателя тягового сопротивления при различной глубине обработки почвы. Тяговое сопротивление будет изменяться в пределах 0,79–1,81 кН при изменении глубины обработки почвы от 4 до 12 см.



Р и с. 7. График трехмерной поверхности отклика

F i g. 7. 3D response surface plot

*Источник:* составлено авторами.*Source:* compiled by the authors.

С точки зрения качественных показателей в ходе экспериментальных исследований было установлено, что наибольшей устойчивостью по глубине хода (7,9–19,6 %) с наименьшей неравномерностью ( $\pm 0,7$ – $1,0$  см) обладает вариант с установленным углом крошения плоскорежущих крыльев  $f = 0^\circ$  при функционировании во всем диапазоне скоростей движения. При этом же параметре угла крошения гребнистость, по сравнению с другими вариантами (2,5–4,0 см), наименьшая (2,0–2,5 см). Также обеспечивается лучшая выровненность поверхности поля до 1,7–2,0 раз, по сравнению с установленным углом крошения  $f = 5^\circ$  и  $f = 10^\circ$ .

При функционировании варианта с  $f = 0^\circ$  степень крошения пласта увеличивается с ростом скорости движения: с 87,8–88,2 % при 2,21 м/с до 92,3–92,8 % при 3,61 м/с.

Полученная математическая модель тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом парового культиватора, позволит более точно подходить к вопросу проектирования сельскохозяйственных машин. Становится возможным рациональное использование мощности мобильных энергосредств при проектировании агрегатов под конкретный тяговый класс, а также снижение металлоемкости всего агрегата ввиду оптимизации количества применяемых рабочих органов на раме машины.

**Обсуждение и заключение.** В результате проведенного исследования была получена математическая модель, учитывающая влияние глубины обработки почвы, углов крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев и скорости движения агрегата. Она позволяет определить оптимальные параметры функционирования рабочего органа парового культиватора с учетом исследуемых факторов. Также было установлено, что при глубине обработки почвы  $h = 4$  см, угле крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев  $f = 0^\circ$  и скорости движения агрегата  $v = 2,61$  м/с достигается наименьшее тяговое сопро-

тивление  $P_T = 0,72$  кН, создаваемое рабочим органом. Угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа рекомендуется принять  $f = 0^\circ$ , а скорость движения агрегата  $v = 2,91$  м/с.

Таким образом, учитывая рекомендуемые оптимальные параметры рабочего органа парового культиватора, по полученной математической модели возможно рассчитать значение показателя тягового сопротивления при различной глубине обработки почвы. Тяговое сопротивление будет варьироваться в пределах 0,79–1,81 кН при изменении глубины обработки почвы от 4 до 12 см.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Припоров Е. В. Технологические, энергетические и экономические показатели работы универсального парового культиватора // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (83). С. 198–202. URL: [https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia\\_83\\_2020\\_g.pdf](https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_83_2020_g.pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
2. Мяло В. В., Мяло О. В., Демчук Е. В. Обоснование основных параметров рабочего органа культиватора для сплошной обработки почвы // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (34). С. 153–164. URL: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24\\_34.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24_34.pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
3. Свечников П. Г. Оптимальный профиль лапы культиватора-плоскореза // Тракторы и сельхозмашины. 2012. Т. 79, № 1. С. 40. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69372>
4. Старовойтов С. И. Горизонтальная составляющая тягового сопротивления стрельчатой лапы с переменным углом крошения и с трансформированным лезвием // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 1 (53). С. 79–86. URL: [https://www.bgsha.com/download/education/library/1\(53\)\\_2016.pdf](https://www.bgsha.com/download/education/library/1(53)_2016.pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
5. Исследование влияния параметров рабочих органов и режимов работы культиватора модульного типа на качество поверхностной обработки почвы / О. В. Лисунов [и др.] // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 1 (61). С. 190–196. URL: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1\(61\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1(61).pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
6. Джаббаров Н. И., Сергеев А. В. Классификация условий функционирования и определение рациональных конструктивных параметров почвообрабатывающего рабочего органа // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 3 (104). С. 48–58. URL: <https://agroecoengineering.szni.ru/images/Jurnal/nomera/zhurnal-104.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).
7. Теоретическое обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего агрегата / С. Л. Дёмшин [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2020. № 2 (105). С. 18–31. URL: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=1825](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825) (дата обращения: 01.11.2023).
8. Граборов К. Н., Жилкин В. А. Компьютерное моделирование деформированного состояния «Почвы» в системе MSC. Patran // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 6. С. 17–19. URL: <https://clck.ru/39xbT4> (дата обращения: 01.11.2023).
9. 3D Finite Element Analysis of Tine Cultivator and Soil Deformation / M. Hashaam [et al.] // Research in Agricultural Engineering. 2023. Vol. 69, Issue 3. P. 107–117. <https://doi.org/10.17221/58/2022-RAE>
10. Chappell A., Webb N. P. Using Albedo to Reform Wind Erosion Modelling, Mapping and Monitoring // Aeolian Research. 2016. Vol. 23. P. 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.09.006>
11. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators / Y. Abbaspour-Gilandeh [et al.] // Agriculture. 2020. Vol. 10, Issue 5. P. 145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>
12. Effects of Fallow Tillage on Winter Wheat Yield and Predictions Under Different Precipitation Types / Y. Feng [et al.] // PeerJ. 2021. Vol. 9. Article no. e12602. <https://doi.org/10.7717/peerj.12602>
13. Konrad J. M., Lebeau M. Capillary-Based Effective Stress Formulation for Predicting Shear Strength of Unsaturated Soils // Canadian Geotechnical Journal. 2015. Vol. 52, Issue 12. P. 2067–2076. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0300>

14. Seasonal and Inter-Annual Variability of Soil Moisture Stress Function in Dryland Wheat Field, Australia / V. R. Akuraju [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017. Vol. 217. P. 450–451. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.007>
15. Moderate Drought Stress Affected Root Growth and Grain Yield in Old, Modern and Newly Released Cultivars of Winter Wheat / Y. Fang [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. Article no. 00672. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00672>
16. Маслов Г. Г., Юдина Е. М., Журий И. А. Эффективность поверхностной обработки почвы стерневым многофункциональным культиватором // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. Т. 85, № 3. С. 7–11. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66365>
17. The Random Vibrations of the Active Body of the Cultivators / P. Cardei [et al.] // *Agriculture*. 2023. Vol. 13. Article no. 1565. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1517.v1>
18. Okoko P., Umani K. C., Onwe D. N. Performance Evaluation of a Spring Tine Cultivator in a Sandy Loam Soil // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2023. Vol. 25, Issue 2. P. 21–33. URL: <https://clck.ru/39x8LA> (дата обращения: 01.11.2023).
19. Sun C., Zhou J., Zhao J. Traction Resistance Estimation Based on Multi-Method Fusion for Distributed Drive Agricultural Vehicles // *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, Issue 10. P. 9580–9588. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3162652>

## REFERENCES

1. Priporov E.V. Technological, Energy and Economic Performance Indices of a Universal Fallow-Field Cultivator. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(3):198–202. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia\\_83\\_2020\\_g.pdf](https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_83_2020_g.pdf) (accessed 01.11.2023).
2. Myalo V.V., Myalo O.V., Demchuk E.V. Foundation of the Basic Parameters of the Working Bodies of Cultivators for Continuous Tillage. *Vestnik of Omsk SAU*. 2019;(2):153–164. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24\\_34.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24_34.pdf) (accessed 01.11.2023).
3. Svechnikov P.G. The Optimal Profile of Subsurface Cultivator Hoe. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2012;79(1):40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69372>
4. Starovoitov S.I. Horizontal Component of Draft Resistance of Center Hoe with Variable Angle of Crumbling and Transformed Edge. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2016;(1):79–86. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.bgsha.com/download/education/library/1\(53\)\\_2016.pdf](https://www.bgsha.com/download/education/library/1(53)_2016.pdf) (accessed 01.11.2023).
5. Lisunov O.V., Boginya M.V., Vasiliev A.A., Oleinikova E.N. Study of Parameter Influence of the Working Bodies and Operating Modes of a Modular Type Cultivator on Quality of Surface Soil Tillage. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2023;(1):190–196. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1\(61\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1(61).pdf) (accessed 01.11.2023).
6. Dzhabborov N.I., Sergeev A.V. Classification of Operating Conditions of a Tillage Tool and Determining its Rational Design Parameters. *AgroEcoEngineering*. 2020;(3):48–58. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://agroecoengineering.sznii.ru/images/Jurnal/nomera/zhurnal-104.pdf> (accessed 01.11.2023).
7. Demshin S.L., Andreev L.A., Ilyichev V.V., Isupov A.Ju. Theoretical Justification of the Constructive-Technological Scheme of the Multifunctional Tillage Unit. *Bulletin NGIEI*. 2020;(2):18–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=1825](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825) (accessed 01.11.2023).
8. Graborov K.N., Zhilkin V.A. [Computer Modeling of the Deformed State of the “Soil” in the MSC System Patran]. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2007;(6):17–19. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/39xbT4> (accessed 01.11.2023).
9. Hashaam M., Akram M.W., Ahmad M., Akram M.Z., Faheem M., Maqsood M., et al. 3D Finite Element Analysis of Tine Cultivator and Soil Deformation. *Research in Agricultural Engineering*. 2023;69(3):107–117. <https://doi.org/10.17221/58/2022-RAE>
10. Chappell A., Webb N.P. Using Albedo to Reform Wind Erosion Modelling, Mapping and Monitoring. *Aeolian Research*. 2016;23:63–78. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.09.006>
11. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernández-Hernández J.L., Penna A.F., Herrera-Miranda I. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators. *Agriculture*. 2020;10(5):145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>



12. Feng Y., Lin W., Yu S., Ren A., Wang Q., Noor H., et al. Effects of Fallow Tillage on Winter Wheat Yield and Predictions Under Different Precipitation Types. *PeerJ*. 2021;9:e12602. <https://doi.org/10.7717/peerj.12602>
13. Konrad J.M., Lebeau M. Capillary-Based Effective Stress Formulation for Predicting Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015;52(12):2067–2076. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0300>
14. Akuraju V.R., Ryu D., George B., Ryu Y., Dassanayake K. Seasonal and Inter-Annual Variability of Soil Moisture Stress Function in Dryland Wheat Field, Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017;217:450–451. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.007>
15. Fang Y., Du Y., Wang J., Wu A., Qiao S., Xu B., et al. Moderate Drought Stress Affected Root Growth and Grain Yield in Old, Modern and Newly Released Cultivars of Winter Wheat. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:00672. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00672>
16. Maslov G.G., Yudina E.M., Zhurij I.A. Efficiency of Surface Treatment of Soil by a Stubble Multifunctional Cultivator. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;85(3):7–11. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66365>
17. Cardei P., Constantin N., Muraru V., Persu C., Sfiru R., Vladut N.-V., et al. The Random Vibrations of the Active Body of the Cultivators. *Agriculture*. 2023;13:1565. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1517.v1>
18. Okoko P., Umani K. C., Onwe D.N. Performance Evaluation of a Spring Tine Cultivator in a Sandy Loam Soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2023;25(2):21–33. Available at: <https://clck.ru/39x8LA> (accessed 01.11.2023).
19. Sun C., Zhou J., Zhao J. Traction Resistance Estimation Based on Multi-Method Fusion for Distributed Drive Agricultural Vehicles. *IEEE Sensors Journal*. 2022;22(10):9580–9588. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3162652>

*Об авторах:*

**Божко Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Researcher ID: E-9518-2016, [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

**Камбулов Сергей Иванович**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), профессор кафедры технологий и оборудования переработки продукции АПК Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Researcher ID: A-6156-2019, [kambulov.s@mail.ru](mailto:kambulov.s@mail.ru)

**Пархоменко Галина Геннадьевна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, Researcher ID: D-2633-2019, [parkhomenko.galya@yandex.ru](mailto:parkhomenko.galya@yandex.ru)

**Рыков Виктор Борисович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), профессор кафедры технологий и оборудования переработки продукции АПК Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1358-9312>, Researcher ID: A-6319-2019, [rikovvb@gmail.com](mailto:rikovvb@gmail.com)

**Подлесный Дмитрий Сергеевич**, ведущий инженер отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), старший преподаватель кафедры технологий и оборудования переработки продукции АПК Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-138X>, Researcher ID: L-3658-2017, [podlesniy.dmitri@yandex.ru](mailto:podlesniy.dmitri@yandex.ru)



*Заявленный вклад авторов:*

И. В. Божко – определение методологии исследования, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, проведение экспериментальных исследований и обработка полученных данных.

С. И. Камбулов – научное руководство, постановка задачи, обработка полученных данных.

Г. Г. Пархоменко – анализ научных источников по теме исследования, обработка полученных данных.

В. Б. Рыков – определение методологии исследования, обработка полученных данных.

Д. С. Подлесный – проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 25.11.2023; поступила после рецензирования 23.01.2024;  
принята к публикации 05.02.2024*

*About the authors:*

**Igor V. Bozhko**, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Researcher ID: E-9518-2016, [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

**Sergey I. Kambulov**, Dr.Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Professor of the Department Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Researcher ID: A-6156-2019, [kambulov.s@mail.ru](mailto:kambulov.s@mail.ru)

**Galina G. Parkhomenko**, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, Researcher ID: D-2633-2019, [parkhomenko.galya@yandex.ru](mailto:parkhomenko.galya@yandex.ru)

**Victor B. Rykov**, Dr.Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Professor of the Department Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1358-9312>, Researcher ID: A-6319-2019, [rikovvb@gmail.com](mailto:rikovvb@gmail.com)

**Dmitry S. Podlesny**, Leading Engineer of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Senior Lecturer of the Department of Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-138X>, Researcher ID: L-3658-2017, [podlesny.dmitri@yandex.ru](mailto:podlesny.dmitri@yandex.ru)

*Authors contribution:*

I. V. Bozhko – determining the research methodology, collecting and analyzing analytical and practical materials on the research topic, conducting experimental studies and processing the data obtained, analyzing and finalizing the solution.

S. I. Kambulov – scientific leadership, problem formulation, finalization of the solution.

G. G. Parkhomenko – analysis of scientific sources on the research topic, finalization of the solution.

V. B. Rykov – determining the research methodology, finalizing the solution.

D. S. Podlesny – conducting experimental research and finalizing the solution.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 25.11.2023; revised 23.01.2024; accepted 05.02.2024*



## Justification of Dual-Level Opener Parameters in Digital Twin by the Discrete Element Method

S. G. Mudarisov<sup>✉</sup>, I. M. Farkhutdinov, R. Yu. Bagautdinov

Bashkir State Agrarian University  
(Ufa, Russian Federation)

<sup>✉</sup> [salavam@gmail.com](mailto:salavam@gmail.com)

### Abstract

**Introduction.** The discrete element method is the most promising method for modeling soil tillage. With the use of DEM modeling it is possible to create a digital twin for technological process of interaction of tools with soil, analyze the operation of tillage and seeding machines having various design and technological parameters, and predict energy and agrotechnical indicators of their work. To improve the prediction accuracy, it is necessary to compare the obtained data with the results of field experiments.

**Aim of the Study.** The study is aimed at developing a digital twin of the tillage bin through using the discrete element method and optimizing the main design and technological parameters of the dual-level opener.

**Materials and Methods.** To simulate the process of the soil-opener interaction, there was used the discrete element method; the advanced Hertz–Mindlin model was used as a contact model. For DEM modeling there is created a virtual tillage bin, which is filled with spherical particles of 10 mm diameter with the specified rheological parameters of the selected contact model. The main design factors for carrying out computer experiments in order to optimize them were the opener blade rake angle  $\alpha$  and the furrow rake angle  $\beta$ . The opener traction resistance  $R$  was chosen as the output optimization parameter.

**Results.** Implementation of multifactor experiments on the digital twin of the soil bin in the Rocky DEM program allowed to optimize the design and technological parameters of the dual-level opener: bit inclination angle  $\alpha = 75^\circ$ , furrow former inclination angle  $\beta = 21^\circ$ , vertical distance between the bit and furrow former  $\Delta a = 11\text{--}14$  mm.

**Discussion and Conclusion.** As a result of the modeling, it was found that the opener traction resistance increases in quadratic dependence on the opener operating speed and surface energy of the contact model.

**Keywords:** modeling of technological process, sowing, tillage, coulter, traction resistance, contact model, Hertz–Mindlin model, Jonson–Kendall–Roberts model, virtual soil bin

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

**Funding:** The research is carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-76-10070.

**For citation:** Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Bagautdinov R.Yu. Justification of Dual-Level Opener Parameters in Digital Twin by the Discrete Element Method. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):229–243. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.229-243>



## Обоснование параметров комбинированного сошника в цифровом двойнике методом дискретных элементов

С. Г. Мударисов<sup>✉</sup>, И. М. Фархутдинов, Р. Ю. Багаутдинов  
Башкирский государственный аграрный университет  
(г. Уфа, Российская Федерация)

✉ [salavam@gmail.com](mailto:salavam@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Наиболее перспективным для моделирования процессов обработки почвы является метод дискретных элементов. Моделирование методом дискретных элементов позволяет создать цифровой двойник технологического процесса взаимодействия рабочих органов с почвой и провести анализ работы почвообрабатывающих и посевных машин с разными конструктивно-технологическими параметрами, а также спрогнозировать энергетические и агротехнические показатели работы орудий. При этом для увеличения точности прогнозирования результатов, полученных в ходе реализации виртуальной модели, необходимо сопоставлять данные с результатами лабораторных и полевых исследований.

**Цель исследования.** Разработать цифровой двойник почвенного канала методом дискретных элементов и оптимизировать с помощью него основные конструктивно-технологические параметры комбинированного сошника.

**Материалы и методы.** Для моделирования процесса взаимодействия сошника с почвой методом дискретных элементов в качестве образца контакта выбрана усовершенствованная модель Герца – Миндлина. В таком случае создается виртуальный почвенный канал, который заполняется сферическими частицами диаметром 10 мм с заданными реологическими параметрами выбранной модели контакта. Основными конструктивными факторами для проведения компьютерных экспериментов в целях их оптимизации приняты угол наклона долота сошника  $\alpha$  и угол наклона бороздообразователя  $\beta$ , в качестве выходного параметра оптимизации – тяговое сопротивление сошника  $R$ .

**Результаты исследования.** Реализация многофакторных экспериментов на цифровом двойнике почвенного канала в программе Rocky DEM позволила оптимизировать конструктивно-технологические параметры комбинированного сошника: угол наклона долота  $\alpha = 75^\circ$ , угол наклона бороздообразователя  $\beta = 21^\circ$ , расстояние между долотом и бороздообразователем по вертикали  $\Delta a = 11\text{--}14$  мм.

**Обсуждение и заключение.** В результате моделирования установлено, что тяговое сопротивление сошника растет по квадратичной зависимости от его рабочей скорости. Увеличение поверхностной энергии контактной модели также ведет к росту тягового сопротивления сошника.

**Ключевые слова:** моделирование технологического процесса, посев, обработка почвы, сошник, тяговое сопротивление, модель контакта, модель Герца – Миндлина, модель Джонсона – Кендалла – Робертса, виртуальный почвенный канал

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10070.

**Для цитирования:** Мударисов С. Г., Фархутдинов И. М., Багаутдинов Р. Ю. Обоснование параметров комбинированного сошника в цифровом двойнике методом дискретных элементов // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 229–243. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.229-243>

**Introduction.** Meeting the needs of modern fast-developing agriculture requires constant improvement in the operational efficiency of agricultural machinery and tools. The methods of theoretical analysis, modeling and experimental research are most often used to develop new and improve existing machines in order to increase their efficiency. In view of the developed numerical methods for implementing various theoretical approaches using applied engineering calculation programs, computer modeling is the most promising tool for designing machines. Computer modeling has a number of advantages such as low cost and lack of reference to seasonality compared to experimental studies.

To model the tillage technological process, various modeling methods based on the numerical implementation of systems of equations for various media dynamics are used, such as computational fluid dynamics (CFD), the smoothed particle hydrodynamics method (SPH), the finite element method (FEM) and the most promising to date the discrete elements method (DEM) [1].

A limiting factor in the effective application of the discrete element method for modeling soil is the important need for computing resources and high requirements for calibrating the parameters of the contact models used, because of the great variability of the physical and mechanical properties of soils and their anisotropy.

**Literature Review.** At the initial stage, the study of the discrete element method application for solving soil tillage problems was aimed at calibrating the parameters of the contact models used. The parameters of the contact models were calibrated mainly by the angle of repose [2–4]. Despite its simplicity, a comparison of the results by the angle of the pile formed by the soil and discrete particles resting on a horizontal base after pouring out of a cylindrical or cone-shaped funnel made it possible to determine the range of changes in the parameters of contact models [5; 6].

The studies show that the behavior of the modeled soil, obtained by modeling discrete elements, largely depends on the choice of the contact model parameters. At the same time, a large number of studied factors such as the Poisson's ratio, static and dynamic friction coefficients, Young's modulus, surface energy, particle diameter, etc must be taken into account as the main parameters of contact models and properties of model particles. The evaluation of the parameters significance was carried out by S. G. Mudarisov [7]. It was found out that the pattern of change in the angle of response of the soil medium, modeled by the discrete element method, is affected significantly by the surface energy and particle diameter.

Then, the contact models parameters were specified by more complex calibration methods, for example, by the draught resistance of working tools or soil movement (formation of ridges and furrows) based on the results of field tests and modeling.

The research by C. Saunders, M. Ucgul, R. J. Goodwin presents the results of parameters calibration of a soil modeled simulated by the discrete element method using spherical particles of different diameters [8]. A tillage bin model with particles having a radius of 1.5 mm with upper layer of 20 mm thick and a lower layer of particles with a radius of 10 mm showed the most reliable results of simulating draught resistance of a tillage tool.

The input parameters of the DEM were calibrated to model a cohesive soil using a contact model with a hysteresis spring coupled with a linear cohesion model for

spherical particles with a diameter of 10 mm in the angle of natural slope and in the displacement of particles (formation of ridges and furrows) when interacting with an anchor coulter (K. A. Aikins et al.) [9]. According to the research results, the following input parameters of the contact model are recommended for modeling cohesive soils: damping coefficient equal to 0.05, stiffness coefficient equal to 0.95, soil liquid limit equal to 2.8 MPa, particle cohesive energy density equal to 46,400 J/m<sup>3</sup>, particle cohesive energy density-tool equal to 14,900 J/m<sup>3</sup>.

N. R. Makange et al. have compared the DEM of the soil-tillage interaction modeling with a mouldboard plow was compared with the results of field experiments on the horizontal and vertical draft forces and bulk density of the soil [10]. In their study, the model of a hysteresis spring and a linear cohesive contact (HS/LC model) was used as a contact model. According to the experimental results, the accuracy of the prediction of the vertical force turned out to be higher than the accuracy of the horizontal force.

S.G. Mudarisov et al. calibrated the parameters of the contact model for the improved Hertz–Mindlin JKR model by comparing the horizontal, vertical and lateral components of plow body resistance according to the results of laboratory and field studies and also modelling of a similar body geometrically using the discrete element method [11]. It was found that the most similar results with an relative error of 4.6–7.6% are observed at the surface energy of discrete particles equal to 270–400 J/m<sup>2</sup>.

After obtaining comparable results of modeling by the discrete element method and of soil behavior, the researchers evaluated the energy and agro-technical indicators of soil tillage and justify the structural and technological parameters of the tillage machine tools.

In the work by S. Xuefeng et al. the use of the discrete element method made it possible to justify the rake angle of the tiller used in ridge-furrow technique for grain farming at lower draught resistance [12].

The design and technological parameters of a deep-filler in a virtual bin filled with discrete spherical particles having a diameter of 6 mm was substantiated by S.H. Hoseinian et al. [13]. The parameters of the Hertz–Mindlin contact model with parallel connections were calibrated by the natural angle of repose and by the draft force in a soil bin in a sandy loam.

L. Liu et al. has been developed a model to analyze the soil covered with straw and the T-shaped furrow-opener interaction by discrete element method [14]. The accuracy of the model was confirmed by comparing the draught force, down force, displacement of soil forward and sideways, as well as displacement of straw forward through physical and simulation experiments. The modeling helped to justify the shape of the opener side blades and the range of operating speeds for effective performance.

K. Liu et al. used a discrete soil simulation to evaluate the impact of structural and technological parameters of a subsioler on draught resistance [15]. The modeling made it possible to justify the rake angle of the ripper paw with a lower draught resistance. At the same time, as in the previous case, the simulation results were compared with the results of field studies on the tillage bin.

The analysis of works shows that discrete element modeling allows analyzing the interaction of soil with tillage and seeding tools having different design and technological parameters. It is also possible to predict energy and agro technological operating results

of the tools. At the same time to increase the accuracy of predicting the results obtained during virtual model implementation of soil-tillage tool interaction, it is necessary to compare the data received with the laboratory and field study results.

The aim of the study is to develop a digital twin of a tillage bin by using the discrete elements method and optimize the basic design and technological parameters of the dual-level opener.

**Materials and Methods.** To develop a model of soil and dual-level opener interaction process there was used the discrete element method. The improved Hertz–Mindlin JKR (Johnson Kendall Roberts) model was selected as a contact model based on previous studies [7; 11] to take into account the adhesive and cohesive properties of the soil. For this model, the Young's modulus  $E$ , MPa, Poisson's ratio  $\nu$ , coefficient of static friction  $f_{st}$ , dynamic friction coefficient  $f_d$ , surface energy  $J_s$ , J/m<sup>2</sup> and etc. are established as rheological parameters included in the contact model. For conducting experiments, according to the data of previously conducted [11] experiments, the following values of these parameters were taken (Table 1).

The parameters of the Hertz–Mindlin JKR model were calibrated by comparing the components of the draught resistance of the plow body at different humidity levels according to the results of laboratory studies on the tillage bin and modelling by the discrete elements method in an early study [11].

Table 1

Contact Model Parameters

No	Parameters	Value
1	Young's modulus of soil particles $E$ , MPa	$1 \times 10^8$
2	Young's modulus of steel (dual-level opener) $E_{st}$ , MPa	$1 \times 10^{10}$
3	Poisson's ratio $\nu$	0.3
4	Soil-on-soil static friction coefficient $f_{st}$	0.7
5	Soil-on-soil dynamic friction coefficient $f_d$	0.6
6	Surface energy $G_s$ , J/m <sup>2</sup>	300–340
7	Recovery coefficient	0.3
8	Coefficient of static friction $f_{st,k}$	0.3
9	Coefficient of dynamic friction $f_{d,k}$	0.15

Source: Hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

For discrete element modeling a virtual tillage bin is created. Its dimensions are determined on the zone of soil deformation by working tools. According to the technique described in our previous study [7], in order to avoid exposure of tillage bin walls on soil mass, which is formed during soil-opener interaction, the tillage bin dimensions are taken as follows: width is 1,200 mm, height is 500 mm, length is 1,500 mm (Fig. 1a). 3D model of a tillage bin with specified dimensions is created in COMPASS 3D program, which is then imported to RockyDEM program.

The tillage bin is filled with particles at one cycle by creating layers of particles around a specified central starting point of coordinates (Fig. 1b). These layers continue to be created, increasing a number of particles of a specified size and shape until one of



the two things happens: either they reach a specified mass value or they reach specified limits of the tillage bin walls (Fig. 1b). Based on the previously justified data [16], for this series of experiments there were adopted the particle parameters presented in Table 2.

**Parameters of Discrete Particles for Filling the Bin**

Table 2

№	Parameter	Value
1	Diameter of particles, mm	10
2	Shape of particles	sphere
3	Apparent density of particles, kg/m <sup>3</sup>	1,400
4	Density of particles, kg/m <sup>3</sup>	2,333
5	Number of particles in a bin	716,198

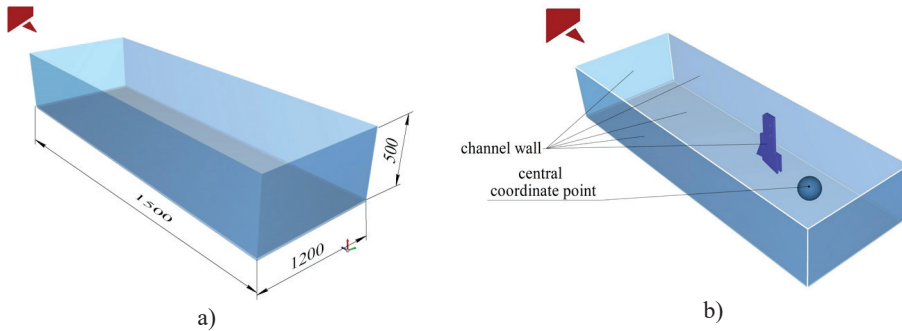


Fig. 1. Virtual soil bin: a) bin size dimension; b) the process of filling the bin with particles  
Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

716,198 particles are required for filling the tillage bins with given geometric dimension.

At the top of the tillage bin a 3D model of opener is installed at a specified seeding depth. It is designed in COMPASS 3D program for the design and technological parameters specified according to matrix of conducting experiments (Fig. 2). For modeling the soil-opener interaction process, the opener must move along the channel at a speed corresponding to its operating speed.

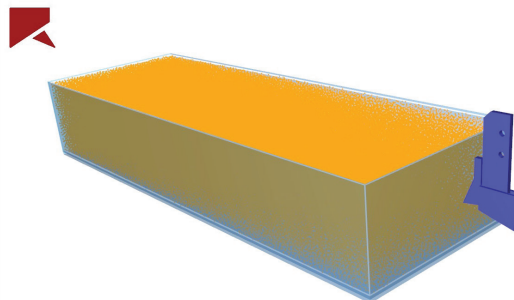


Fig. 2. Tillage bin, filled with discrete particles



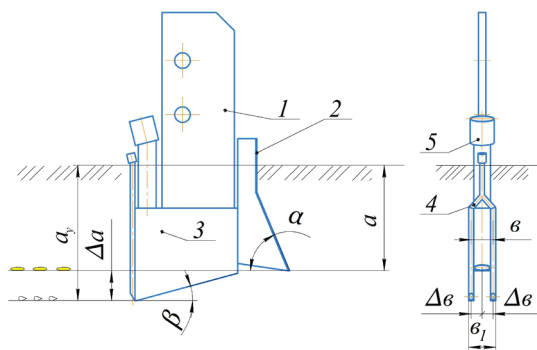


Fig. 3. Dual-level opener for variable depth application of fertilizers and seeds:  
1 – tine; 2 – share; 3 – furrower; 4 – a tube for applying liquid complex fertilizer; 5 – grain tube

To implement the proposed scheme of separate sowing and fertilization, we introduce a dual-level opener (Fig. 3). The technological process of multi-depth application of liquid fertilizers and seed sowing is carried out by installing two furrowers 3 on the sides of the share 2. The tubes for applying liquid complex fertilizers 4 are installed behind them at a certain distance from the seeds.

The share 2 of the dual-level opener forms a seedbed in the furrow, where seeds enter through seed ducts 5, and furrowers 3 form two grooves in the soil, where liquid fertilizers enter through tubes 4. After the dual-level opener has passed, the formed furrows are closed with crumbled soil and pressed with a roller [16].

The main design and technological parameters of the dual-level opener are the depth of sowing  $a$ , the depth of applying fertilizers  $a_y$ , the working speed  $V$  and the width of the share  $b$ . The best-investigated design and technological parameters are working speed, stroke depth of the working body, and the width of the dual-level opener. The influence and dependencies of these parameters on the energy indicators are well known. The optimal position of fertilizers to seeds in our case determined by the vertical and horizontal distances of the soil between the dual-level opener and the furrowers is justified by C. J. Baker [17].

In this regard, the main factors for conducting computer experiments with the purpose of optimizing them, there are taken the following design and technological parameters of the dual-level opener (Fig. 3):

1. X1 is the rake angle the coulter share  $\alpha$ , degrees;
2. X2 is the rake angle of the furrower  $\beta$ , degrees.

The draught resistance of the coulter  $R$  is accepted as the output parameter of the optimization of the experiment.

Three measurements are taken for each of the factors: the lower, zero and upper levels. Table 3 shows the values of the experimental factors at these levels and the conditions for conducting a full-factor experiment (FFE). The experiments were carried out according to the plan  $3^2 = 9$  for encoded and decoded values of factors. Factor X1 varied between  $70^\circ$  and  $90^\circ$  with a zero level of  $80^\circ$ , factor X2 varied between  $15^\circ$  and  $35^\circ$  with a zero level of  $25^\circ$ .

Table 3

FFE conditions – values of experimental factors

Plan characteristics	X1 = $\alpha$ , degrees (dual-level opener rake angle)	X2 = $\beta$ , degrees. (furrower rake angle)
Lower level	70	15
Zero level	80	25
Upper level	90	35
Variation interval	10	10

The laboratory experiments were carried out on a tillage bin filled with chernozem soil of loamy sand mechanical composition at a humidity level of 17.9–19.5%.

For the experiments, there were manufactured removable furrowing devices with different angles  $\beta$ . In addition, the design of the experimental dual-level opener made it possible to change the distance  $\Delta a$  between the share and the furrower vertically (Fig. 3) that was an additional factor in the experiments. Thus, the furrower rake angle  $\beta$  and the distance  $\Delta a$  between them were chosen as factors of laboratory experiments, and the draft resistance of the opener  $R$  was chosen as the output parameter.

The experimental segment with a dual-level opener (Fig. 4b) through a parallelogram mechanism was fixed to a three-point suspension device of a tillage bin drive trolley (Fig. 4a). Strain gauges are installed in the hitch draft arm allowing the load to be recorded up to 3 tons (Fig. 4b).

Measuring complex MIC-400D was used for recordings the readings of strain meters during the experiments (Fig. 4). The calibration of the measuring sensors of the Strain gauge was carried out using a calibrator – a hydraulic breaking machine GRM-20.

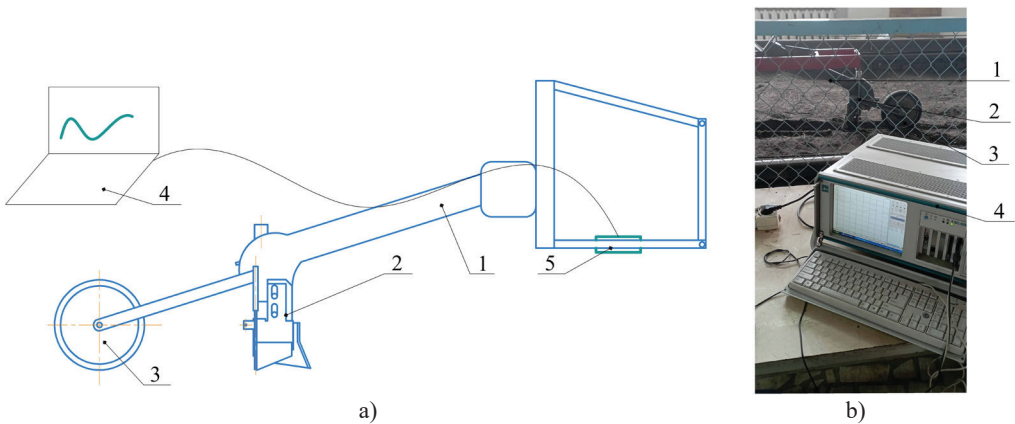


Fig. 4. Experimental section with dual-level opener on a tillage bin: a) dual-level opener; b) general view of the device. The photo by S. G. Mudarisov, 2023

The software package for statistical analysis STATISTICA was used to process the experimental results obtained during the implementation of a multifactorial experiment.

The obtained results were processed by methods of mathematical statistics, the adequacy of the model was evaluated according to the Fisher criterion.

**Results.** The implementation of the developed digital twin of the tillage bin by the discrete element method allows visualizing the soil and dual-level opener interaction. Figure 5 shows a fragment of the soil deformation process by dual-level opener during operating in the longitudinal plane. Figure 6 shows the process of furrow and seedbed formation after share applying and compacted furrow after furrow opener applying. The colour palette on figures shows the vertical motion of particles.

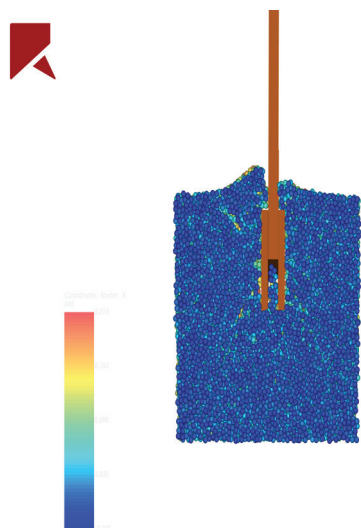


Fig. 5. Soil deformation process by dual-level opener

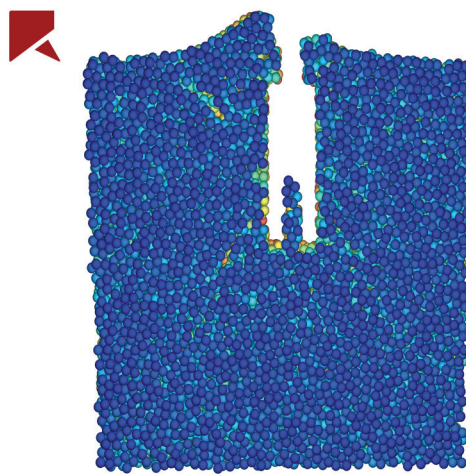


Fig. 6. Furrow formation process for seeds and fertilizers

As a result of the implementation of the FFE, a regression equation was obtained in decoded form:

$$R = 124.50 + 1.29\alpha + 13.25\alpha\beta^2 - 11.40\alpha^2\beta,$$

which allows us to assess the influence of factors – the rake angle of the coulter share  $\alpha$  and the furrower  $\beta$  of the coulter on its draught resistance  $R$ .

Figure 7 shows 3D surface dependency graph of draught resistance  $R$  of dual-level opener and rake angles of share  $\alpha$  and furrower  $\beta$ . Figure 8 shows counter plot graph (two-dimensional sections) of this dependency.

From the presented dependencies (Fig. 7, 8) it can be seen that the draught resistance of the coulter has its minimum values at the angles of furrower to the bottom of the furrow equal to  $\beta = 15\text{--}22^\circ$  and share installation at  $\alpha = 74\text{--}81^\circ$ .

In the course of computer model experiments to clarify calibrated parameters the influence of surface energy  $J_s$  and operating coulter speed  $V$  on its draught resistance  $R$  was evaluated.

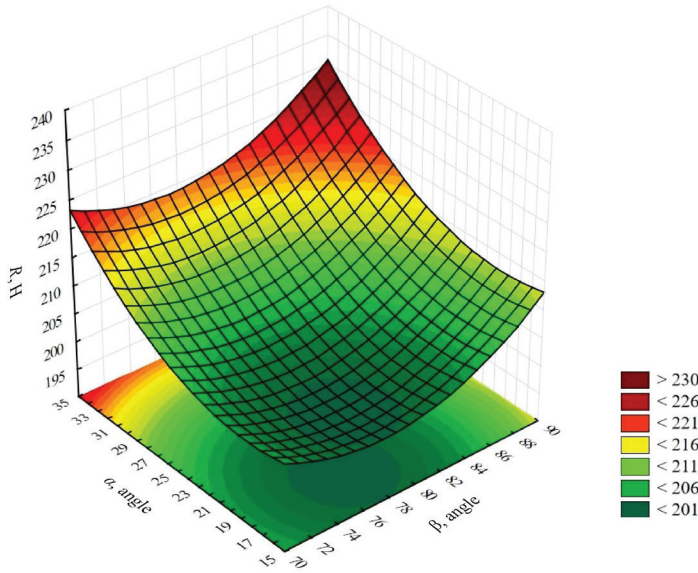


Fig. 7. Three-dimensional surface dependency graph of draught resistance  $R$  on share rake angles  $\alpha$  and furrow  $\beta$  of dual-level opener

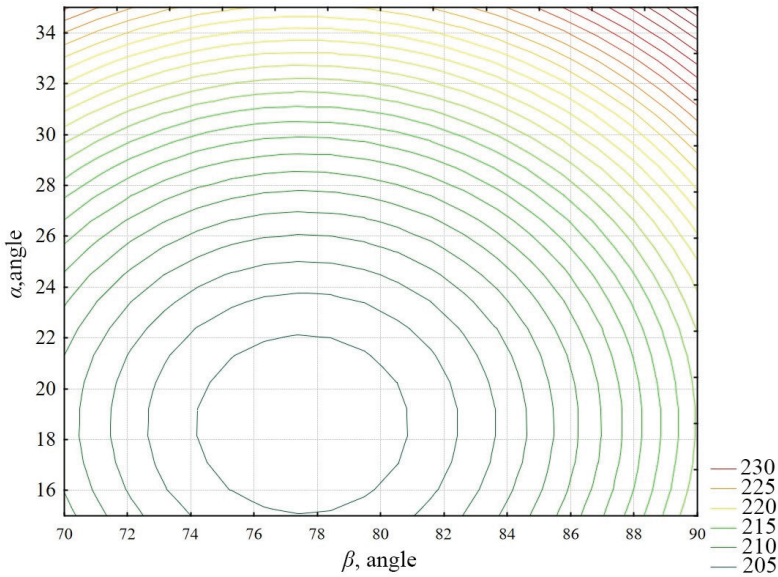


Fig. 8. Counter plot dependency graph of draught resistance  $R$  on share rake angles  $\alpha$  and furrow opener  $\beta$  of dual-level opener

Figure 9 shows the graphical interpretation for the dependencies of the opener draught resistance  $R$  on its working speed  $V$  at different values of surface energy  $J_s$  of the discrete elements contact model.

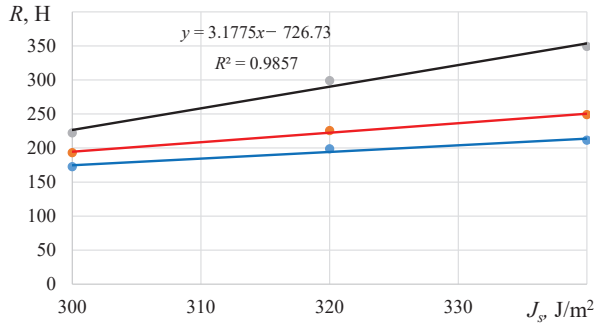


Fig. 9. Dependence of dual level opener draught resistance  $R$  on velocity  $V$  at the change of contact model  $J_s$  surface energy: 1 -  $J_s = 300$  J/m<sup>2</sup>; 2 -  $J_s = 320$  J/m<sup>2</sup>;  $J_s = 340$  J/m<sup>2</sup>

Figure 10 shows three-dimensional surface graph of dependency of draught resistance  $R$  on the angle of furrow opener installation  $\beta$  and the distance between share and furrower  $\Delta a$ . Figure 11 shows two-dimensional section of this dependency at the share width  $b = 15$  mm according to the results of laboratory experiments on tillage bin.

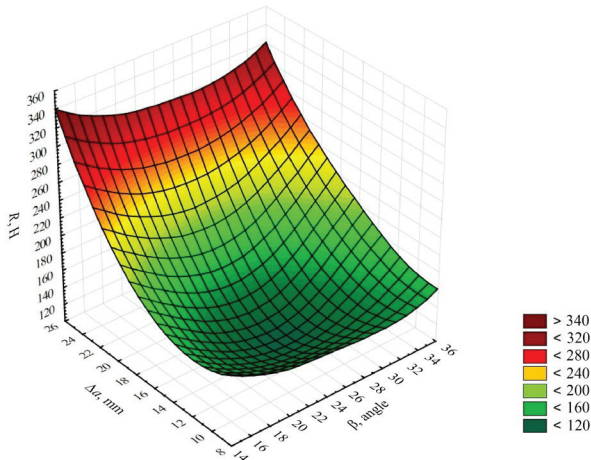


Fig. 10. Three-dimensional surface graph of dependency of draught resistance  $R$  on the angle of furrower installation and the distance between share and furrower  $a$

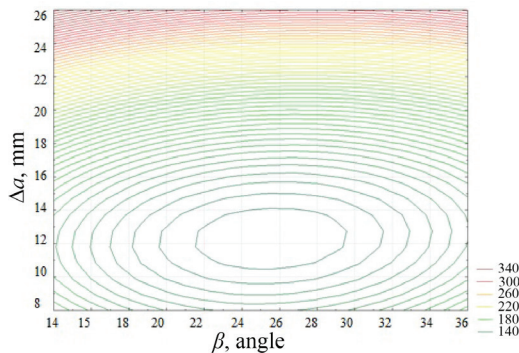


Fig. 11. Counterplot graph of dependency of draught resistance  $R$  on the angle of furrower installation and the distance between share and furrower  $a$



From the obtained dependencies (Fig. 10, 11) it can be seen that coulter draught resistance  $R$  is minimal if used with furrower having rake angle  $\beta = 21\text{--}29^\circ$  and the vertical distance between share and furrower  $\Delta a = 11\text{--}14$  mm.

**Discussion and Conclusion.** From the obtained dependencies (Fig. 8) it can be seen that the coulter draught resistance  $R$  increases according to quadratic dependence which does not contradict the laws of classical agricultural mechanics.

An increase in surface energy also leads to an increase in draught resistance. With an increase in surface energy from  $300$  to  $340$  J/m<sup>2</sup>, the draught resistance at a speed of  $2$  m/s increases by  $22.6\%$ , and at a speed of  $2.3$  m/s by  $57.1\%$  (Fig. 12). Such an increase of draught resistance coincides with correlation dependencies obtained by S. G. Mudarisov [16] on the values of surface energy modeled by the discrete elements method of the soil environment to the humidity of real soil [11] according to which the increase in surface energy allows us to simulate the type and humidity of the soil. According to [11], the values of the surface energy  $J_s = 320\text{--}340$  J/m<sup>2</sup> correspond to the soil of a heavy loamy mechanical composition, and  $J_s = 300$  J/m<sup>2</sup> corresponds to a loamy soil mechanical composition.

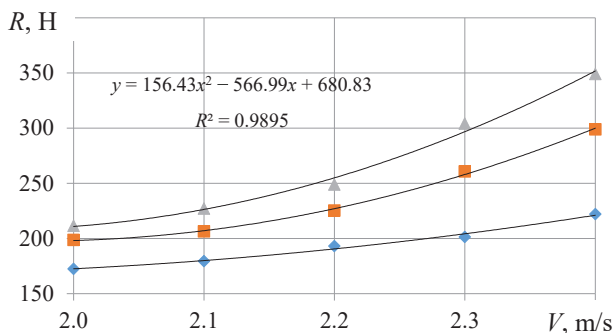


Fig. 12. Dependence of dual-level opener draught resistance  $R$  on surface energy of simulated soil  $J_s$ : 1 –  $V = 2.0$  m/s; 2 –  $V = 2.2$  m/s; 3 –  $V = 2.4$  m/s

Ultimately, a computer model of the coulter-soil environment interaction process in the soil bin, implemented by the discrete elements method is a digital twin of the developed dual-level opener. The implementation of multifactorial experiments on a digital twin made it possible to visualize the process of coulter-soil interaction and optimize its design and technological parameters:

- the rake angle of the coulter share to the bottom of the furrow  $\alpha = 74\text{--}81^\circ$ ;
- the rake angle of the coulter furrower to the bottom of the furrow  $\beta = 15\text{--}22^\circ$ .

Laboratory experiments with an experimental opener on a tillage bin made it possible to clarify the installation angle of the furrower  $\beta = 21\text{--}29^\circ$ , at which the traction resistance is minimal. Thus, in the course of modeling and field laboratory experiments, there were obtained results close to optimal values of the angle of inclination of the furrower  $\beta = 15\text{--}22^\circ$  and  $\beta = 21\text{--}29^\circ$ , respectively that indicates the right choice of parameters of the contact model when modeling the soil using the discrete element method.

The variation in draught resistance between the results of laboratory and model experiments is 2.9–5.8% at the distance between the coulter share and the furrower  $\Delta a = 0\text{--}15$  mm and 1.5–4.2% at the distance  $\Delta a = 16\text{--}35$  mm, which shows good convergence of the results when predicting the draught resistance of the coulter based on the results of modelling by the method of discrete elements.

When comparing the results of modelling and field experiments for practical use, the following design and technological parameters of the dual-level opener can be recommended: the rake angle of the share  $\alpha = 75^\circ$ , the rake angle of the furrower  $\beta = 21^\circ$ , the distance between the share and the furrower vertically  $\Delta a = 11\text{--}14$  mm.

*Discussion and Conclusion.* A developed digital twin of the dual-level opener is a computer model of the soil environment-dual-level opener interaction process in the bin by the discrete element method. The improved Hertz-Mindlin JKR model has been adopted as a contact model for taking into account the adhesive and cohesive properties of the soil.

A virtual tillage bin with dimensions filled with 716,198 spherical particles with a diameter of 10 mm was created for discrete element method modelling.

The implementation of multifactorial experiments on a digital twin made it possible to optimize the design and technological parameters of the combined coulter:

- the rake angle of the share coulter to the bottom of the furrow  $\alpha = 72\text{--}83^\circ$ ;
- the rake angle of coulter furrower to the bottom of the furrow  $\beta = 15\text{--}25^\circ$ .

The draught resistance of the coulter increases according to quadratic dependency on its operating speed. An increase in the surface energy of the contact model also leads to an increase in the draught resistance of the coulter. With an increase in surface energy from 300 to 340 J/m<sup>2</sup>, the draught resistance increases by 22.6% at a speed of 2 m/s and by 57.1% at a speed of 2.3 m/s.

In the course of laboratory studies with an experimental coulter on a tillage bin, the minimum draught resistance of the coulter was obtained at the installation angle of the furrower  $\beta = 21\text{--}29^\circ$ .

For practical use, the following design and technological parameters of the dual-level opener are recommended: the rake angle of the share  $\alpha = 75^\circ$ , the rake angle of the furrower  $\beta = 21^\circ$ , the distance between the share and the furrower vertically  $\Delta a = 11\text{--}14$  mm.

The digital twin of the soil bin, simulated by discrete element method, allows us to substantiate and optimize the parameters of the of tillage and seeding machines working bodies by numerically modelling their operation, taking into account various options for structural and technological parameters and soil properties. By justifying the parameters of the coulter in a digital twin using DEM, you can get valuable information about the operation of the coulter and make informed decisions on improving its design and characteristics.

## REFERENCES

1. Cundall P.A, Strack O.D.L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*. 1979;29(1):47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
2. Ucgul M., Fielke J., Saunders C. Three-Dimensional Discrete Element Modelling of Tillage: Determination of a Suitable Contact Model and Parameters for a Cohesionless Soil. *Biosystem Engineering*. 2014;121(2):105–117. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.005>



3. Roessler T., Katterfeld A. DEM Parameter Calibration of Cohesive Bulk Materials Using a Simple Angle of Repose Test. *Particuology*. 2019;45:105–115. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.08.005>
4. Barr J.B., Ucgul M., Desbiolles J.M., Fielke J.M. Simulating the Effect of Rake Angle on Narrow Opener Performance with the Discrete Element Method. *Biosystems Engineering*. 2018;171:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.013>
5. Wang X., Zhang Q., Huang Y., Ji J. An Efficient Method for Determining Dem Parameters of a Loose Cohesive Soil Modelled Using Hysteretic Spring and Linear Cohesion Contact Models. *Biosystems Engineering*. 2022;215:283–294. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.015>
6. Qi L., Chen Y., Sadek M. Simulations of Soil Flow Properties Using the Discrete Element Method (DEM). *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;157:254–260. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.052>
7. Mudarisov S., Farkhutdinov I., Khamaletdinov R., Khasanov E., Mukhametdinov A. Evaluation of the Significance of the Contact Model Particle Parameters in the Modelling of Wet Soils by the Discrete Element Method. *Soil and Tillage Research*. 2022;215:105228. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105228>
8. Saunders C., Ucgul M., Godwin R.J. Discrete Element Method (DEM) Simulation to Improve Performance of a Mouldboard Skimmer. *Soil and Tillage Research*. 2021;205:104764. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104764>
9. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B., Jensen T.A., Antille D.L., Jack M.A. Determination of Discrete Element Model Parameters for a Cohesive Soil and Validation Through Narrow Point Opener Performance Analysis. *Soil and Tillage Research*. 2021;213:105123. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105123>
10. Makange N.R., Ji C., Torotwa I. Prediction of Cutting Forces and Soil Behavior with Discrete Element Simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;179:105848. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105848>
11. Mudarisov S., Lobachevsky Y., Farkhutdinov I., Khasanov E., Rakhimov I. Justification of the Soil Dem-Model Parameters for Predicting the Plow Body Resistance Forces During Plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023;109:37–44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001>
12. Song X., Dai F., Zhang X., Chen H., Zhang F., Zhao W. Numerical Analyses Ridge-Forming for Whole Film-Mulching and Double Ridge-Furrow, a Discrete Element Method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023;215:108364. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108364>
13. Hoseinian S.H., Hemmat A., Esehaghbeygi A., Shahgoli G., Baghbanan A. Development of a Dual Sideway-Share Subsurface Tillage Implement: Part 2. Effect of Tool Ggeometry on Tillage Forces and Soil Disturbance Characteristics. *Soil and Tillage Research*. 2022;215:105200. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105200>
14. Liu L., Wang X., Zhang X., Cheng X., Wei Z., Zhou H., et al. The Impact of ‘T’-Shaped Furrow Opener of No-Tillage Seeder on Straw and Soil Based on Discrete Element Method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023;213:108278. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108278>
15. Liu K., Sozzi M., Gasparini F., Marinello F., Sartori L. Combining Simulations and Field Experiments: Effects of Subsoiling Angle and Tillage Depth on Soil Structure and Energy Requirements. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023;214:108323. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108323>
16. Godzhaev Z., Mudarisov S., Farkhutdinov I. Evaluation of the Influence of the Discrete Elements’ Shape on the Results of Soil Modelling. *Springer International Publishing*. 2022;602–611.
17. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Yamaletdinov M.M., Bagautdinov R.Yu., Kinzyabulatoeva E.R. [Dual-Level Anchor Coulter]. Patent 207,073 Russian Federation. 2021 March 22. 4 p. (In Russ.)

*About the authors:*

**Salavat G. Mudarisov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechatronic Systems and Machines of Agricultural Production, Bashkir State Agrarian University (34 Ul. 50-letiya Oktyabrya, Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>, Researcher ID: G-2217-2018, [salavam@gmail.com](mailto:salavam@gmail.com)

**Ildar M. Farkhutdinov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechatronic Systems and Machines of Agricultural Production, Bashkir State Agrarian University (34 Ul. 50-letiya

Oktyabrya, Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>, ResearcherID: G-2816-2018, [ildar1702@mail.ru](mailto:ildar1702@mail.ru)

**Rustam Yu. Bagautdinov**, Postgraduate Student of the Department of Mechatronic Systems and Machines of Agricultural Production, Bashkir State Agrarian University, (34 Ul. 50-letiya Oktyabrya, Ufa 450001, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5908-5269>, [mr.rbv@bk.ru](mailto:mr.rbv@bk.ru)

*Authors contribution:*

S. G. Mudarisov – formulation of the basic concept of the study, literary analysis, interpretation of research results, preparation of the first version of the text and formulation of conclusions.

I. M. Farkhutdinov – developing experimental research methodology, processing experimental data, developing a computer model, conducting machine experiments.

R. Yu. Bagautdinov – manufacture of an experimental coulter, conducting laboratory experiments.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

Submitted 15.01.2024; revised 29.01.2024; accepted 15.02.2024

*Об авторах:*

**Мударисов Салават Гумерович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мехатронных систем и машин аграрного производства Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9344-2606>, ResearcherID: G-2217-2018, [salavam@gmail.com](mailto:salavam@gmail.com)

**Фархутдинов Ильдар Мавляирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6443-8584>, ResearcherID: G-2816-2018, [ildar1702@mail.ru](mailto:ildar1702@mail.ru)

**Багаутдинов Рустам Юнирович**, аспирант кафедры мехатронных систем и машин аграрного производства Башкирского государственного аграрного университета (450001, Российская Федерация, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5908-5269>, [mr.rbv@bk.ru](mailto:mr.rbv@bk.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

С. Г. Мударисов – формулирование основной концепции исследования, литературный анализ, интерпретация результатов исследований, подготовка начального варианта текста и выводов.

И. М. Фархутдинов – разработка методики экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных, разработка компьютерной модели, проведение машинных экспериментов.

Р. Ю. Багаутдинов – изготовление экспериментального сошника, проведение лабораторных экспериментов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Поступила в редакцию 15.01.2024; поступила после рецензирования 29.01.2024;  
принята к публикации 15.02.2024



## Параметры и режимы работы гидравлической мини-сеялки мелкосемянных овощных культур

Е. В. Труфляк<sup>✉</sup>, И. С. Скоробогаченко, В. И. Коновалов  
Кубанский государственный аграрный университет  
(г. Краснодар, Российская Федерация)

<sup>✉</sup> [trufliak@mail.ru](mailto:trufliak@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** В области выращивания сельскохозяйственных растений с использованием воды и суспензий обозначена тенденция развития гидропосева газонной травы. Направление менее изучено для посева мелких проклюнувшихся и пророщенных семян овощей, поскольку специализируется на семенах арбуза, тыквы, огурцов и табака. Отсутствуют исследования для гидропосева семян моркови, петрушки, укропа, салата, томатов и сельдерея. Таким образом, актуальными являются теоретические изыскания, направленные на обоснование способа и технических решений посева мелкосемянных культур в условиях открытого и закрытого грунта. Проблема заключается в отсутствии конструктивно-технологической схемы резервуара для формирования посевной смеси мелкосемянных культур, конструктивно-режимных показателей гидравлической мини-сеялки рядкового посева для повышения его эффективности.

**Цель исследования.** Оптимизация параметров и режимов работы гидравлической мини-сеялки рядкового посева.

**Материалы и методы.** Выполнялись теоретические исследования процесса гомогенизации посевной смеси, потребной мощности при работе резервуара для формирования посевной смеси. Лабораторные исследования проводились в Кубанском государственном аграрном университете, полевые – в личных подсобных хозяйствах Крымского района Краснодарского края.

**Результаты исследования.** Получены выражения, описывающие зависимость величины средней окружной скорости потока посевной смеси, а также мощности при работе резервуара для ее формирования при различных сочетаниях конструктивных и режимных параметров. Представлена аналитическая зависимость, описывающая величину концентрации семян в несущей среде в заданный момент времени на фиксированной точке высоты резервуара.

**Обсуждение и заключение.** Оптимальные параметры и режимы работы универсальной гидросеялки по шагу посева: частота вращения мешалки – 92 мин<sup>-1</sup>; величина открытия крана – 47 %; скорость сеялки – 3,1 м/с при шаге посева 20,5 мм; по коэффициенту вариации шага посева: частота вращения мешалки – 87 мин<sup>-1</sup>; величина открытия крана – 56 %; скорость сеялки – 2,7 м/с при вариации шага посева 15 %. Перспективным и заслуживающим дальнейшего развития направлением является использование суспензий для гидропосева овощных культур.

**Ключевые слова:** гидравлический посев, семена, посевная смесь, вода, овощи, мини-сеялка

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Труфляк Е. В., Скоробогаченко И. С., Коновалов В. И., 2024



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

*Для цитирования:* Труфляк Е. В., Skorobogachenko И. С., Коновалов В. И. Параметры и режимы работы гидравлической мини-сеялки мелкосемянных овощных культур // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 244–264. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.244-264>

## Parameters and Modes of a Hydraulic Mini Seeder Operation for Small-Seeded Vegetable Crops

E. V. Truflyak<sup>✉</sup>, I. S. Skorobogachenko, V. I. Kononov

*Kuban State Agrarian University  
(Krasnodar, Russian Federation)*

<sup>✉</sup> [trufliak@mail.ru](mailto:trufliak@mail.ru)

### Abstract

*Introduction.* In the area of sowing with water and suspensions, there has been observed the trend of the development of hydroseeding lawn grass. The direction is less studied for sowing small seeds (germinated and sprouted) of vegetables. Existing works are mainly aimed at substantiating the sowing of germinated seeds of watermelons, pumpkins, cucumbers and tobacco. At the same time, there are no studies for hydroseeding of carrot, parsley, dill, lettuce, tomatoes and celery seeds. Thus, theoretical research aimed at substantiating the method and technical solutions for sowing small-seeded crops in open and closed ground conditions are relevant. The problem is the lack of constructive-technological scheme of the tank for formation of sowing mixture of small-seeded crops, design and mode parameters of hydraulic mini seeder for sowing in drills to increase the efficiency of sowing.

*Aim of the Study.* The study is aimed at optimizing parameters and modes for operation of a hydraulic mini seeder for sowing in drills.

*Materials and Methods.* Theoretical studies of the process of homogenization of the seed mixture, power consumption during the operation of the reservoir for the formation of the seed mixture were carried out. Laboratory studies were carried out in Kuban State Agrarian University, field studies in private farms of Krymsky district of Krasnodar Krai.

*Results.* There have been obtained the expressions describing the dependence of the value of the average circumferential velocity of the seed mixture flow and the power during the operation of the reservoir for the formation of seed mixture for various combinations of design and operating parameters. The analytical dependence describing the value of seed concentration in the carrier medium at a specified moment of time at a fixed point of the tank height is presented.

*Discussion and Conclusion.* Optimal parameters and modes for the operation of a universal hydroseeder for a seeding step are: agitator rotation frequency – 92 min<sup>-1</sup>; crane opening value – 47%; seeder speed – 3.1 m/s at seeding step 20.5 mm; for seeding step variation coefficient: agitator rotation frequency – 87 min<sup>-1</sup>; crane opening value – 56%; seeder speed – 2.7 m/s at seeding step variation 15%. The use of suspensions for hydroseeding vegetable crops is promising and should be developed.

**Keywords:** hydraulic seeding, seeds, seed mix, water, vegetables, mini seeder

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

**For citation:** Truflyak E.V., Skorobogachenko I.S., Kononov V.I. Parameters and Modes of a Hydraulic Mini Seeder Operation for Small-Seeded Vegetable Crops. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):244–264. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.244-264>

**Введение.** На территории России более 20 видов овощных культур имеют массовое распространение. Площади, отведенные под посев и сбор урожая овощных культур, в хозяйствах всех категорий за последние 5 лет показывают стабильный

*Agricultural engineering*

рост. Отрасль закрытого грунта в стране стремится к полному импортозамещению. По данным Росстата, уровень самообеспечения в 2021 г. достиг 71,7 %.

Для посева газонной травы в последнее время используется гидравлический способ, заключающийся в перемешивании в емкости семян, воды, геля, красителя, удобрений и их дальнейшем равномерном распределении через шланг на почву.

Способ использования воды и суспензий для посева мелких семян овощей является менее изученным. Обеспечение урожайности овощных культур закладывается на этапе качественного посева, но в настоящий момент отсутствуют универсальные сеялки для гидравлического посева мелкосемянных овощных культур (проклюнувшихся и пророщенных) с использованием в качестве перемешивающего и транспортирующего компонента воду.

Актуальными являются вопросы теоретического и экспериментального исследования способа гидравлического посева и технических решений для его осуществления в условиях открытого и закрытого грунта. Необходимо обосновать параметры и режимы работы универсальной гидравлической мини-сеялки мелкосемянных овощных культур.

Проблемой является отсутствие конструктивно-технологической схемы резервуара для формирования посевной смеси мелкосемянных культур, конструктивно-режимных показателей гидравлической мини-сеялки рядкового посева для повышения эффективности данного процесса.

Целью настоящей работы является оптимизация параметров и режимов работы гидравлической мини-сеялки рядкового посева.

**Обзор литературы.** Термином «гидропосев» в настоящее время обозначается способ посева травы для газонов и склонов. При таком методе применяется смесь, в которую входят семена, мульчирующий материал, краситель и другие элементы (рис. 1)<sup>1</sup>.

Наиболее распространенными являются гидросеялки водометного типа перемешивания, центробежный насос которых прокачивает пульпу в режиме рециркуляции (рис. 2) [1].

Гидросеялки универсального типа имеют в баке валы с лопастями для подготовки эмульсий, что обеспечивает равномерное распределение компонентов по объему и поддерживает их в гомогенном состоянии до опустошения бака [2].

Рассмотрим технологические решения для гидропосева мелкосемянных культур. Гидросеялка СТР-2 (рис. 3), в которой взвешенное состояние семян обеспечивается механической и пневматической мешалками, предназначена для осуществления посева в теплицах [3–6].

На рисунке 4 представлена разбросная сеялка СПТ-2, агрегируемая с трактором Т-16.

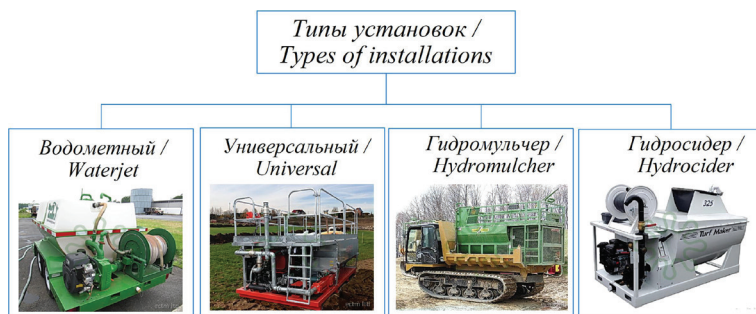
<sup>1</sup> Испытания сеялки для посева семян гидравлическим способом / Е. И. Винеvский [и др.] // Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (06–26 апреля 2015 г., г. Краснодар). Краснодар : ФГБНУ ВНИИТТИ, 2015. С. 249–252. EDN: TYVBBX





Р и с. 1. Фото гидросева газонной травы

F i g. 1. Photo of hydroseeding lawn grass

Источник изображений: <https://gazony.com/>Image source: <https://gazony.com/>

Р и с. 2. Типы гидросеялок

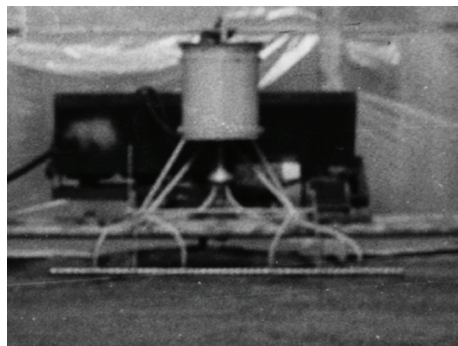
F i g. 2. Types of hydroseeders

Источник изображений: [ru.wikipedia.org](http://ru.wikipedia.org)Image source: [ru.wikipedia.org](http://ru.wikipedia.org)

С целью обеспечения равномерного расхода рабочей жидкости с семенами предложено посевное устройство с сосудом Мариотта, предназначенное для посева при постоянном давлении (рис. 5). Также разработана гидросеялка с пневматическим способом перемешивания (рис. 6).



Учеными Волгоградского государственного аграрного университета предложена сеялка для посева пророщенных семян на основе сеялки СУПН-8 (рис. 7, 8) [7; 8].

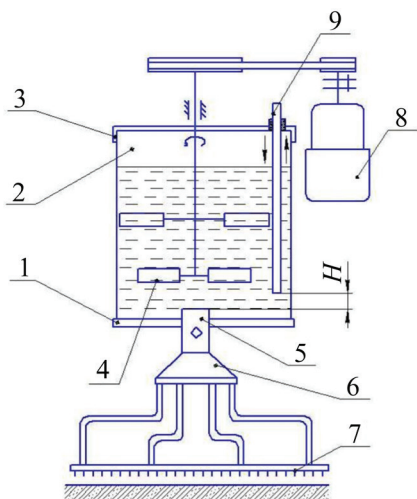


Р и с. 3. Рядковая сеялка СТР-2  
F i g. 3. Row seeder STR-2

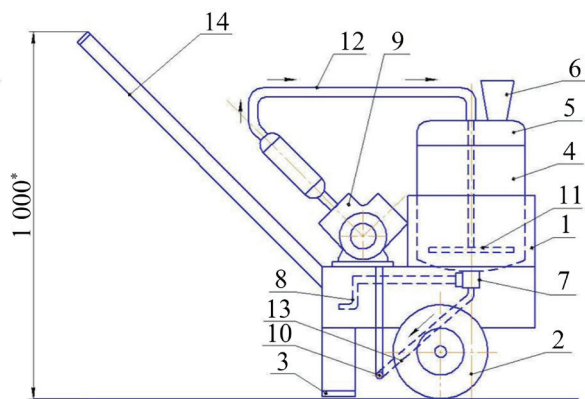


Р и с. 4. Разбросная сеялка СПТ-2  
F i g. 4. Spreading seeder SPT-2

Источник изображений: <http://www.vniitti.ru/>  
Image source: <http://www.vniitti.ru/>



Р и с. 5. Схема сеялки  
F i g. 5. Seeder diagram



Р и с. 6. Схема для гидравлического посева семян  
F i g. 6. Diagram for hydraulic seed sowing

Источник изображений: <http://www.vniitti.ru/>  
Image source: <http://www.vniitti.ru/>



Р и с. 7. Общий вид сеялки  
F i g. 7. General view of the planter



Р и с. 8. Посев пророщенных овощных культур  
F i g. 8. Sowing germinated vegetable crops

Источник изображений: <https://volgau.com/>  
Image source: <https://volgau.com/>

Гидравлическая сеялка [9] снабжена механической мешалкой с П-образными перемешивающими элементами для равномерного распределения семян в воде при небольшой частоте вращения.

В работах Е. В. Труфляка и соавторов изучен гидравлический посев овощных культур с электроактивированной водой [10; 11].

Анализ исследований по теме показал, что существующие машины не предназначены для посева семян овощных культур, так как не обеспечивают равномерное перемешивание их с водой. В случае посева пророщенных семян они могут их травмировать. В настоящей работе предлагается схема уникальной гидросеялки, которая позволяет высевать различные овощные культуры с проклюнувшимися ростками. Разработанная гидросеялка может использоваться и в теплицах.

В предлагаемой нами сеялке для мелкосемянных овощных культур в высевающем аппарате использована мешалка, предназначенная для смешивания семян с водой, поддержания однородности и равномерного перемещения в семяпроводе.

С целью рассмотрения вопроса степени технической проработки результатов интеллектуальной деятельности в области гидропосева проведен патентный анализ (табл. 1) по сайту Федерального института промышленной собственности<sup>2</sup>, а также реестру патентов и изобретений<sup>3</sup>.

На основании обзора патентов и авторских свидетельств в области конструкций сеялок для гидравлического посева выявлен ряд недостатков: отсутствие возможности рядкового посева различных мелкосемянных овощных культур; сложность конструкций, имеющих дополнительные пневматические устройства; неравномерное перемешивание семян; неравномерный посев мелкосемянных овощных культур в ряды; повреждение предварительно пророщенных семян и ростков, налипание их на детали.

<sup>2</sup> Федеральный институт промышленной собственности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fips.ru> (дата обращения: 25.12.2023).

<sup>3</sup> Патентный поиск в РФ [Электронный ресурс]. URL: [www.freepatent.ru](http://www.freepatent.ru) (дата обращения: 25.12.2023).

Таблица 1  
Table 1

 Результаты патентного обзора  
Results of the patent review

Номер патента / Patent number	Название / Title	Особенности / Features	Недостатки / Disadvantages
2287924 [12]	Однорядковая гидросеялка ручная / Single row manual hydroseeder	Имеет камеру, содержащую мешалку и измельчитель течения семенного материала. Гидросеялка имеет плантовый семяпровод с регулируемой подачей смеси / It has a chamber containing an agitator and a seed flow chopper. The hydroseeder has a hose-type seed pipe with adjustment of the mixture supply	Отсутствие равномерного перемешивания семян / Lack of uniform mixing of seeds
1217278 [13]	Устройство для высева семян / Seed sowing device	Содержит бункер, в котором имеется дозатор в виде золотника приводного / Contains a hopper having a metering unit in the form of a spool drive spool	Не обеспечивает посев мелких семян / Does not ensure sowing of small seeds
2536932 [14]	Гидропневматическое посевное устройство / Hydro-pneumatic seeding unit	При движении струя жидкости из насадки обеспечивает образование борозды / When moving, the liquid jet from the nozzle provides a furrow formation	Сложность конструкции / Complexity of design
2028744 [15]	Гидравлическая сеялка / Hydraulic seeder	Имеет дождевальную ствол с соплом, насос с редуктором и всасывающей линией, механизм вращения дождевального ствола, навесное устройство и трактор / It has a sprinkler barrel with nozzle, pump with gearbox and suction line, sprinkler barrel rotation mechanism, hitch and tractor	Отсутствует возможность рядкового посева овощных культур / No possibility to sow vegetable crops in rows
2275784 [16]	Высевающий аппарат / Seeding unit	Предназначен для посева пророщенных семян. Ячейки выполнены по форме и размерам семени и размещены на периферийной части / Designed for sowing germinated seeds. Cells are made according to the shape and size of the seed and are placed on the periphery of the seed	Налипание семян овощных культур на детали, повреждение семян и ростков / Vegetable seeds sticking to parts, damage to seeds and sprouts
113449 [17]	Аппарат для посева проросших семян овощных культур / Apparatus for sowing germinated vegetable seeds	Имеет диск с ячейками в виде ложечек по форме семян. В корпусе установлен уловитель с высевным окном. На дне длинного ящика расположено отверстие, которое подведено к компрессору / It has a disk with spoon-shaped cells in the shape of seeds. In the housing there is a catcher with a sowing window. There is an opening at the bottom of the seed box which is connected to the compressor	Дополнительное пневматическое устройство усложняет конструкцию / The additional pneumatic device makes the design more complex
3263 Республика Беларусь [18] / Republic of Belarus	Насадок для распределения пленкообразующих эмульсий / Nozzle for distributing film-forming emulsions	Содержит диск / It contains a disc	Предназначен для посева газонной травы, а не овощных культур / Designed for sowing lawn grass, not vegetable crops

Источник: здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.  
Source: Hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

Рассмотрим зарубежные работы в данном направлении.

В своем исследовании П. Бансал освещает вопрос разработки и производства высевающего аппарата, основанного на гидравлическом принципе таких семян, как рис, арахис, горох, кукуруза и др. [19].

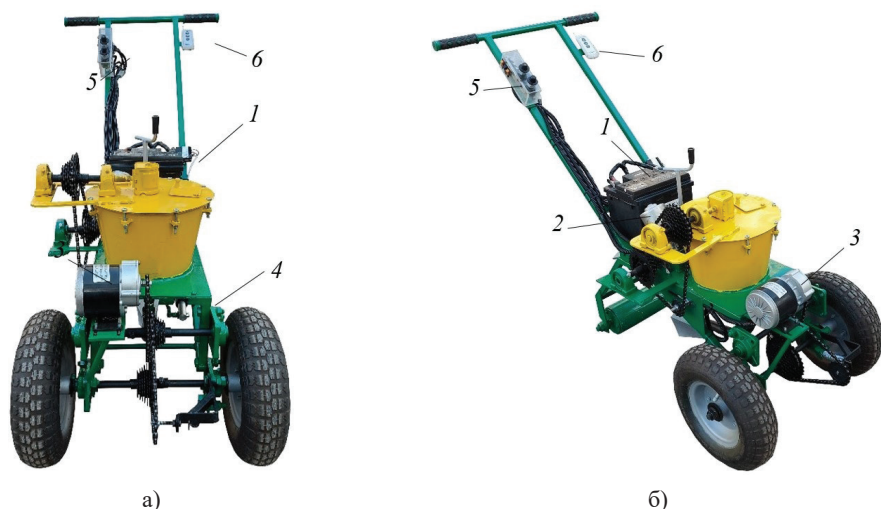
Исследование пневматического оборудования для высева мелких семян в стаканчики представлено в работе В. Пастухова и соавторов [20].

Разработан комплект гидроструйного устройства для автоматического управления тремя операциями: сбрасыванием, подачей семян и контролем струи семян [21].

Влияние гидропосева на урожайность трав и эффективность использования воды на искусственных почвенных склонах лесных дорог рассмотрено в статье А. Парсаху и коллег [22].

Существующие гидросеялки не обеспечивают равномерного перемешивания семян овощных культур с водой. В случае посева пророщенных семян они могут травмировать их. В настоящей работе предлагается универсальная гидросеялка, которая позволяет высевать различные овощные культуры с проклюнувшимися ростками.

**Материалы и методы.** Экспериментальная установка гидросеялки автоматизированной с электрическим приводом мешалки и заслонки представлена на рисунке 9.



Р и с. 9. Гидросеялка автоматизированная с электрическим приводом мешалки и заслонки: а) вид спереди; б) общий вид; 1 – АКБ; 2 – моторредуктор для привода мешалки; 3 – двигатель для привода колес; 4 – электропривод заслонки; 5 – кнопки включения привода колес, мешалки, электроцилиндра; 6 – пульт дистанционного управления. Автор фотографий Е. В. Труфляк, 2023 г.

F i g. 9. Automated hydroseeder with electric drive of agitator and flap: а) front view; б) general view; 1 – battery; 2 – geared motor for agitator drive; 3 – motor for wheel drive; 4 – electric drive of flap; 5 – buttons for wheel drive, agitator, electric cylinder; 6 – remote control unit. The photos are made by E.V. Truflyak, 2023

В конструкции сеялки для устранения зависимости «уровень заполнения – скорость вылива» применялась конструкция сосуда Мариотта (рис. 10). Для увеличения равномерности распределения семян и предотвращения образования воронки



использовались отражающие перегородки, которые служат для организации потока жидкости путем снижения окружной составляющей потока и увеличения осевой и радиальной составляющих.



Рис. 10. Бункер, выполненный с использованием принципа сосуда Мариотта:  
 а) бункер в сборе с трубкой; б) трубка.  
 Автор фотографий Е. В. Труфляк, 2023 г.

Fig. 10. Bunker made using the principle of Mariott's vessel: a) hopper assembled with a tube; b) tube.  
 The photos are made by E.V. Truflyak, 2023

Полевые эксперименты выполнялись с использованием семян 10 овощных культур: моркови, укропа, салата листового, петрушки, редиса, лука, капусты белокачанной, томата, капусты цветной, огурцов.

Исследования проводились в Крымском районе на участке размером 10 на 15 м (рис. 11). Ширина междурядий – 25 см. Осуществлялся посев по 2 ряда каждым способом: гидропосев предварительно замоченных на 10 ч в воде семян; гидропосев предварительно незамоченных семян (семена заранее смешивались в бункере с водой); ручной посев.



Р и с. 11. Фото всходов овощных культур. Автор фотографии Е. В. Труфляк, 2023 г.  
 F i g. 11. Photo of vegetable crops sprouting. The photos are made by E.V. Truflyak, 2023

**Результаты исследования.** Рассмотрим общий расход посевной смеси с учетом исследований В. А. Архипова, А. С. Усанина и др. (рис. 12)<sup>4</sup>:

$$Q_{\text{см}} = \frac{0,056 \cdot 10^{-4} n_p a_m Q (5V_c t_d + 9R_{\text{отв}})(C_V + 1)}{\rho_{\text{сем}} t_d C_V}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{см}}$  – расход посевной смеси, м<sup>3</sup>/с;  $n_p$  – количество одновременно засеваемых рядков, шт.;  $a_m$  – величина междурядья, м;  $Q$  – норма высева, кг/га;  $V_c$  – скорость движения сеялки, км/ч;  $t_d$  – время движения сеялки, с;  $R_{\text{отв}}$  – радиус выпускного отверстия, м;  $C_V$  – объемная доля семян в смеси;  $\rho_{\text{сем}}$  – плотность семян, г/м<sup>3</sup>.

Разработанная конструктивно-технологическая схема резервуара для формирования посевной смеси мелкосемянных культур (рис. 13) предусматривает работу в двух режимах. В первом режиме в резервуар заливается жидкая среда и засыпаются семена, затем включается привод мешалки и в резервуаре создается однородная концентрация смеси семян и жидкой среды. Во втором режиме начинается рабочий ход сеялки, одновременно с которым открывается дозирующее устройство и производится высев семян. Таким образом, в первом режиме работы необходимо определить параметры действия перемешивающего устройства для создания однородно-концентрированной смеси.

Наиболее часто в полуэмпирических гипотезах турбулентного движения макромасштабное распределение концентраций твердых частиц в потоке рассматривается как результат двух одновременно протекающих процессов – конвективного переноса в направлении течения осредненного потока смеси и турбулентной диффузии. Интенсивность турбулентного переноса твердых частиц в жидкой среде определяется коэффициентом диффузии  $D_T$ , который характеризуется величиной его составляющих по осям, называемым локальными значениями коэффициента турбулентной диффузии  $D_{Tx}^n$ ,  $D_{Ty}^n$ ,  $D_{Tz}^n$ . При этом выражение для макромасштабного переноса твердых частиц в несущей среде, с учетом составляющих направления течения и турбулентной диффузии, имеет вид:

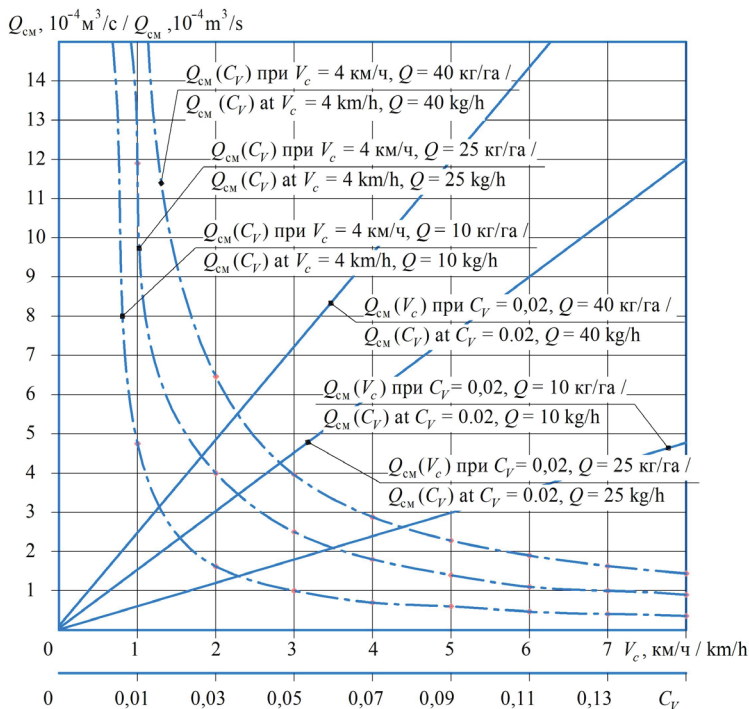
$$\frac{\partial A}{\partial t} + v_x \frac{\partial A}{\partial x} + v_y \frac{\partial A}{\partial y} + v_z \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\partial(D_{Tx}^n \frac{\partial A}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial(D_{Ty}^n \frac{\partial A}{\partial y})}{\partial y} - \frac{\partial(D_{Tz}^n \frac{\partial A}{\partial z})}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где  $c$  – концентрация;  $t$  – момент времени, с;  $D_{Tx}^n$ ,  $D_{Ty}^n$ ,  $D_{Tz}^n$  – локальные значения коэффициентов турбулентной диффузии в направлении осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , м<sup>2</sup>/с;  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  – составляющие скорости осредненного потока смеси в направлении осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , м/с.

На рисунке 14 показана схема диффузионно-циркуляционной модели резервуара для формирования посевной смеси мелкосемянных культур.

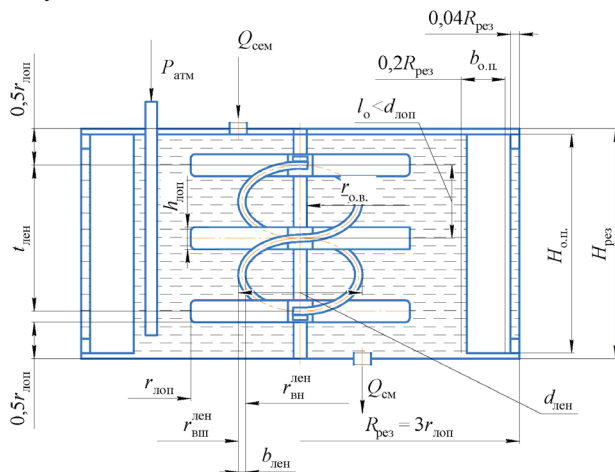
<sup>4</sup> Архипов В. А., Усанина А. С. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде : учеб. пособие. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 252 с.; Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах. Л. : Химия, 1984. 336 с. *Agricultural engineering*





Р и с. 12. Зависимости «расход посевной – конструктивно-режимные параметры сеялки» при  $n_p = 1$ ;  $a_m = 0,5 \text{ м}$ ;  $R_{отв} = 0,02 \text{ м}$ ;  $\rho_{ссм} = 120 \text{ кг/м}^3$   
 Fig. 12. Dependencies «seed rate – design and mode parameters of the seeder» at  $n_p = 1$ ;  $a_m = 0.5 \text{ m}$ ;  $R_{отв} = 0.02 \text{ m}$ ;  $\rho_{ссм} = 120 \text{ kg/m}^3$

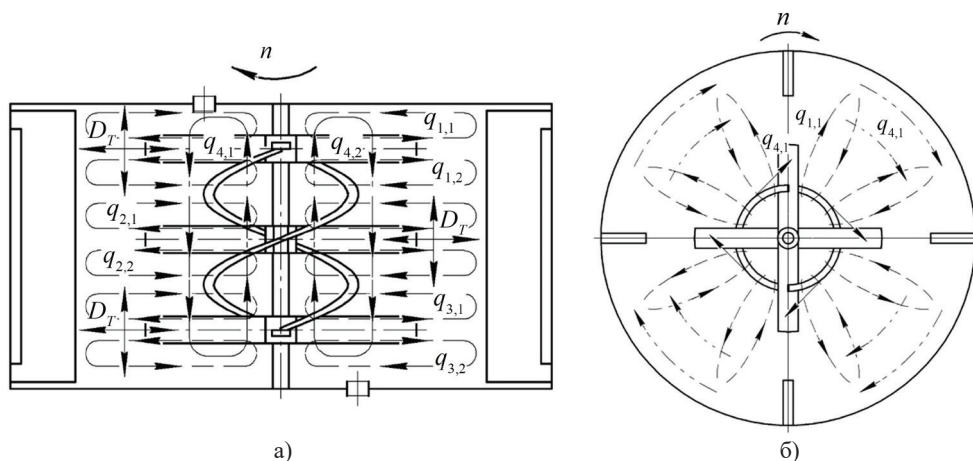
Источник: составлено авторами.  
 Source: Compiled by the authors.



Р и с. 13. Конструктивно-технологическая схема резервуара для формирования посевной смеси мелкосемянных культур

Fig. 13. Structural-technological scheme of the tank for the formation of seed mixture of small-seeded crops

Источник: составлено авторами.  
 Source: Compiled by the authors.



Р и с. 14. Схема диффузионно-циркуляционной модели резервуара для формирования посевной смеси мелкосемянных культур: а) вид сбоку; б) вид сверху

F i g. 14. Schematic diagram of diffusion-circulation model of the reservoir for formation of a seed mixture of small-seeded crops sowing mixture of small-seeded crops: a) side view; b) top view

Источник: составлено авторами.

Source: Compiled by the authors.

Зависимость крутящего момента от радиуса резервуара, оборотов мешалки и плотности смеси имеет криволинейный вид, при этом наибольшее влияние оказывает радиус резервуара, а наименьшее – плотность смеси (рис. 15).

При увеличении радиуса резервуара  $R_{\text{рез}}$  с 0,1 до 0,6 м крутящий момент  $M_{\text{кр}}$  возрастает практически в 7 800 раз, а при увеличении плотности  $\rho_{\text{см}}$  смеси с 800 до 1800 кг/м<sup>3</sup> момент  $M_{\text{кр}}$  возрастает в 2,3 раза. Перечисленные элементы такое же влияние оказывают на величину средней окружной скорости. Поскольку в посевных машинах радиус резервуара заложен конструктивно и в процессе эксплуатации не изменяется, то наиболее целесообразно в качестве регулировочного параметра использовать обороты мешалки. Изменение плотности посевной смеси путем увеличения концентрации семян или использования в качестве несущей среды жидкости с большей плотностью будет приводить к незначительному росту крутящего момента, а также момента сопротивления, что не будет оказывать существенного влияния на процесс гомогенизации посевной смеси.

Мощность, необходимая для перемешивания посевной смеси, представлена следующим образом:

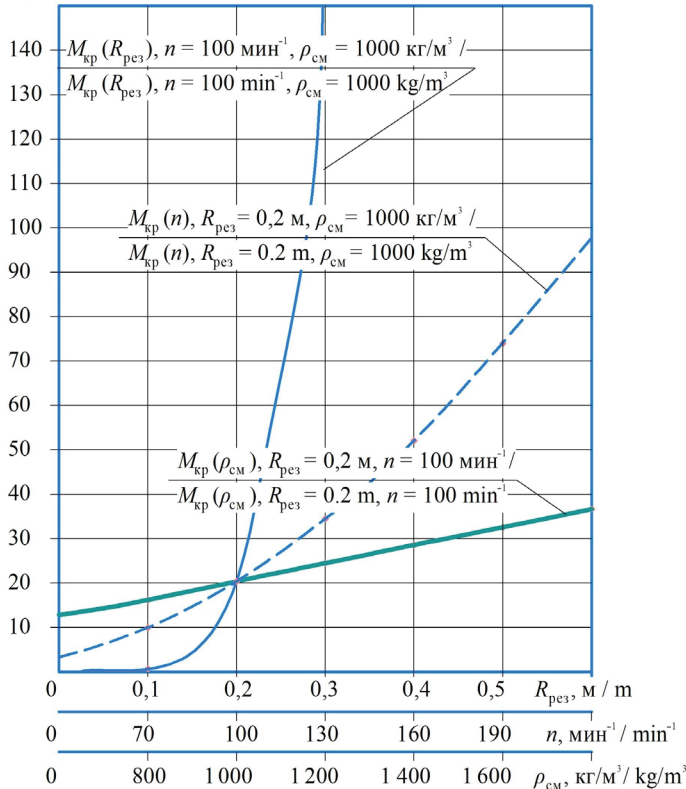
$$N = \omega_{\text{меш}} \times \left[ \frac{0,45 A_3 A_4 (418,5 \cdot 10^{27} R_{\text{рез}}^2 + 24,8 \cdot 10^{33} H_{\text{рез}}^2 + 3,3 \cdot 10^{33} R_{\text{рез}} A_2 - 770,1 \cdot 10^{33} H_{\text{рез}} A_2 - 590,6 \cdot 10^{30} A_6)}{(14,046 \cdot 10^{18} H_{\text{рез}} + 55 \cdot 10^{55} R_{\text{рез}})^2} \right. \\ \left. \times \frac{73,3 \cdot 10^{-3} A_3 A_5 (1,3 \cdot 10^{15} R_{\text{рез}}^2 - 216,8 \cdot 10^{33} H_{\text{рез}}^2 + 3,4 \cdot 10^{36} H_{\text{рез}} A_2 + 828,1 \cdot 10^{30} A_6)}{(14,046 \cdot 10^{18} H_{\text{рез}} + 55 \cdot 10^{55} R_{\text{рез}})^2} \right], \quad (3)$$

где  $\omega_{\text{меш}}$  – угловая скорость мешалки, рад/с;  $\rho_{\text{см}}$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $R_{\text{рез}}$  – радиус резервуара, м;  $H_{\text{рез}}$  – величина заполнения резервуара, м;

$$A_2 = \sqrt{186,808 \cdot 10^{-6} H_{\text{рез}}^2 - 221,718 \cdot 10^{-12} R_{\text{рез}}^2 - 62,269 \cdot 10^{-6} R_{\text{рез}} H_{\text{рез}}};$$

$$A_3 = \rho_{\text{см}} \omega_{\text{меш}}^2 R_{\text{рез}}^4; A_4 = H_{\text{рез}} - R_{\text{рез}}; A_5 = 3H_{\text{рез}} - R_{\text{рез}}; A_6 = R_{\text{рез}} H_{\text{рез}}.$$

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{сопр}}, 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с} / \text{Pas}\cdot\text{s}$$



Р и с. 15. График зависимости крутящего момента мешалки и общего момента сопротивления резервуара для формирования посевной смеси мелкосемянных культур при  $H_{\text{о.п.}} = \frac{2}{3}H_{\text{рез}}, H_{\text{рез}} = 3R_{\text{рез}}, \mu = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$

F i g. 15. Graph of dependence of agitator torque and total torque of the tank resistance for the formation of the seed mixture of small-seeded crops at  $H_{\text{о.п.}} = \frac{2}{3}H_{\text{рез}}, H_{\text{рез}} = 3R_{\text{рез}}, \mu = 1.002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$

Источник: составлено авторами.  
Source: Compiled by the authors.

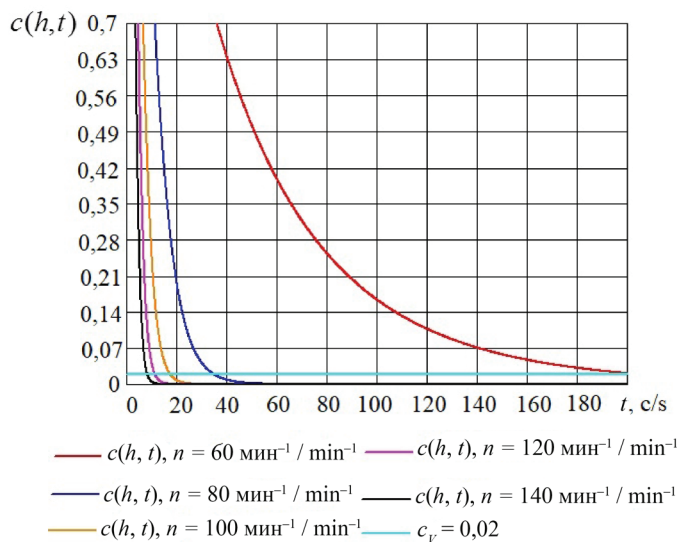
Концентрацию семян в несущей среде в заданный момент времени на фиксированной точке высоты резервуара запишем как:

$$c(h, t) = \frac{m_{\text{сем}}}{S_{\text{пот}} \sqrt{4\pi D_{\text{эф}} t}} \sum_{-n}^n e^{-\frac{(h-ot+2nH_{\text{рез}})^2}{4D_{\text{эф}} t}}, \quad (4)$$

где  $n = \frac{H_{\text{рез}}}{3 \sqrt{\frac{2D_{\text{эф}} H_{\text{рез}}}{V_{\text{эф}} - v_{\text{ос}}}}}$ ;  $V_{\text{эф}}$  – эффективная скорость потока, м/с;  $D_{\text{эф}}$  – эффективный

коэффициент турбулентного переноса;  $v_{\text{ос}}$  – скорость осаждения (всплывания) семян на поверхности, м/с;  $h$  – рассматриваемая точка резервуара, м.

Графики зависимости (4) концентрации семян в несущей среде при  $h = H_{\text{рез}}$  от времени их пребывания в несущем потоке при различном числе оборотов мешалки представлены на рисунке 16.



Р и с. 16. Графики зависимости концентрации семян в несущей среде при  $h = H_{\text{рез}}$  от времени их пребывания в несущем потоке, при  $R_{\text{рез}} = 0,2$  м,  $H_{\text{о.п.}} = \frac{2}{3}H_{\text{рез}}$ ,  $H_{\text{рез}} = 3R_{\text{рез}}$ ,  $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $\rho_{\text{сем}} = 120$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_v = 0,02$

F i g. 16. Plots of dependence of seed concentration in the carrier medium at  $h = H_{\text{рез}}$  on the time of their stay in the carrier flow, at  $R_{\text{рез}} = 0.2$  м,  $H_{\text{о.п.}} = \frac{2}{3}H_{\text{рез}}$ ,  $H_{\text{рез}} = 3R_{\text{рез}}$ ,  $\mu = 1.002 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $\rho_{\text{сем}} = 120$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_v = 0.02$

Источник: составлено авторами.






Source: Compiled by the authors.

Зависимость распределения семян по объему резервуара носит экспоненциальный характер. При увеличении оборотов мешалки с 60 до 140 мин<sup>-1</sup> время на выравнивание концентрации уменьшается с 200 до 10 с. Для работы при оборотах мешалки от 60 мин<sup>-1</sup> и менее потребуется значительное время для гомогенизации посевной смеси. При работе от 100 до 140 мин<sup>-1</sup> и более время для гомогенизации посевной смеси уменьшается в пределах 5–7 с. Таким образом, при работе резервуара для формирования посевной смеси в заданных условиях и параметрах необходимо использовать обороты мешалки от 70 до 130 мин<sup>-1</sup>.

При гидропосеве наблюдается повышение урожайности по сравнению с обычным ручным способом посева (табл. 2, рис. 17).

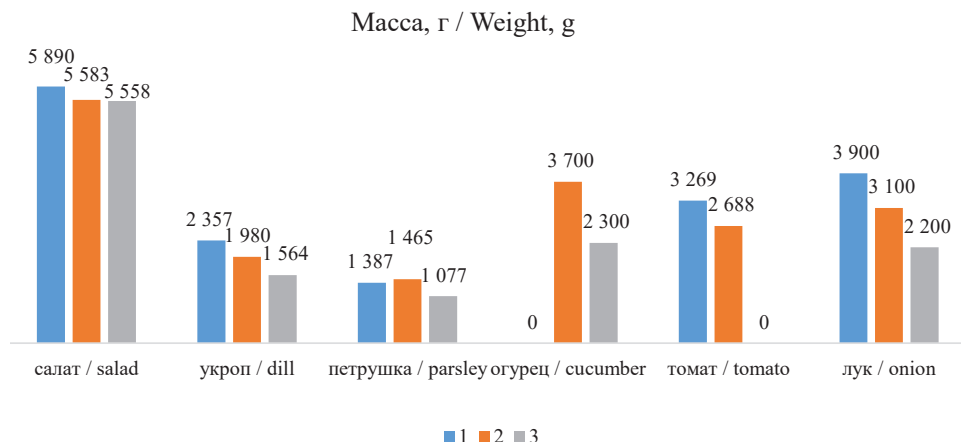
Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Результаты уборки урожая**  
**Harvesting results**

Культура / Culture	День измерения / Day measurements	Повышение урожайности при гидропосеве, % / Yield increase at hydroseeding, %	Фото / Photo
Укроп / Dill	50	27	
Петрушка / Parsley	77	36	
Огурцы / Cucumbers	91	61	
Томат / Tomato	104	22	
Лук / Onions	140	41	

С целью определения оптимальных параметров и режимов работы гидравлической сеялки проводилось планирование эксперимента. В качестве модели выбрали полином второго порядка. Факторы были определены в результате предварительно проведенных однофакторных опытов, а также их фиксированных значений и выбраковки несущественных факторов (табл. 3).

Были выбраны следующие параметры оптимизации: шаг посева по длине и ширине ряда, коэффициент вариации по длине и ширине ряда.



Р и с. 17. Масса растений с одного ряда:

1 – гидропосев семян замоченных; 2 – гидропосев; 3 – посев вручную

F i g. 17. Weight of plants from one row:

1 – hydroseeding of soaked seeds; 2 – hydroseeding; 3 – manual sowing

Источник: составлено авторами.

Source: Compiled by the authors.

При планировании задавались следующие условия и ограничения. Условия: неотрицательность факторов  $n_m > 0$ ;  $\alpha_k > 0$ ;  $V_c > 0$ ; каждый фактор принимает одно или несколько значений ( $n_m = 1 \dots n$ ;  $\alpha_k = 1 \dots n$ ;  $V_c = 1 \dots n$ ); количественное выражение параметра оптимизации; результаты исследований должны быть воспроизводимыми. Ограничения: надежность результатов опыта  $\alpha = 0,95$ ; величина открытия крана  $0 \leq \alpha_k \leq 75\%$ ; ошибка  $\varepsilon = \pm 3S$ .

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

**Факторы и их уровни варьирования**  
**Factors and their levels of variation**

Уровни / Levels	Факторы		
	частота вращения мешалки / rotational speed of agitator ( $x_1$ ), мин <sup>-1</sup>	величина открытия крана / valve opening value ( $x_2$ ), %	скорость движения сеялки / seeder speed ( $x_3$ ), км/ч
Верхний уровень $x_i = +1$ / Upper level	130	75	4
Основной уровень $x_{io} = 0$ / Basic level	100	50	3
Нижний уровень $x_i = -1$ / Lower level	70	25	2

После математической обработки экспериментальных данных мы получили уравнения регрессии для шага посева (в натуральном виде):



– по длине ряда:

$$Y_d = 20,631 - 1,69 \cdot x_1 + 0,82 \cdot x_2 + 0,04 \cdot x_3 - 0,612 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,112 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1,313 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,331 \cdot x_1^2 + 2,419 \cdot x_2^2 + 1,219 \cdot x_3^2. \quad (5)$$

– коэффициент вариации по длине ряда:

$$Y_{dv} = 11,162 - 4,56 \cdot x_1 - 1,59 \cdot x_2 - 4,68 \cdot x_3 + 4,775 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,475 \cdot x_1 \cdot x_3 + 5,725 \cdot x_2 \cdot x_3 - 4,063 \cdot x_1^2 + 8,287 \cdot x_2^2 - 1,563 \cdot x_3^2. \quad (6)$$

– по ширине ряда:

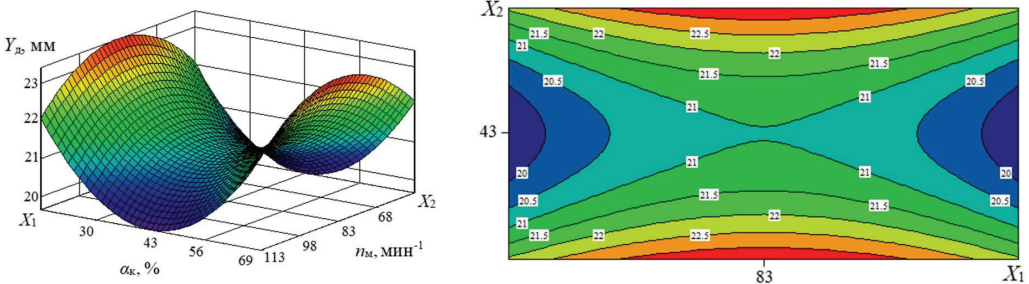
$$Y_{ш} = 20,256 + 0,15 \cdot x_1 + 0,08 \cdot x_2 - 0,12 \cdot x_3 + 1,238 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,038 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,187 \cdot x_2 \cdot x_3 - 2,756 \cdot x_1^2 - 1,906 \cdot x_2^2 + 4,594 \cdot x_3^2. \quad (7)$$

– коэффициент вариации по ширине ряда:

$$Y_{шv} = 15,75 - 7,14 \cdot x_1 - 1,74 \cdot x_2 + 4,62 \cdot x_3 - 2,625 \cdot x_1 \cdot x_2 - 4,75 \cdot x_1 \cdot x_3 - 2,525 \cdot x_2 \cdot x_3 - 5,15 \cdot x_1^2 - 6,85 \cdot x_2^2 + 10,45 \cdot x_3^2. \quad (8)$$

В качестве примера покажем поверхность оптимального значения коэффициента вариации шага посева по длине ряда ( $Y_d$ , мм) от частоты вращения мешалки ( $n_m$ , мин<sup>-1</sup>) и величины открытия крана ( $\alpha_k$ , %) при скорости движения сеялки  $V_c = 3,1$  км/ч (рис. 18).

Оптимальные параметры и режимы работы универсальной гидросеялки по шагу посева следующие: частота вращения мешалки – 92 мин<sup>-1</sup>; величина открытия крана – 47 %; скорость сеялки – 3,1 м/с при шаге посева 20,5 мм.



Р и с. 18. Поверхность зависимости  $Y_d$  от  $n_m$  и  $\alpha_k$  при  $V_c = 3,1$  км/ч и ее сечение

F i g. 18. Surface of the dependence of  $Y_d$  on  $n_m$  and  $\alpha_k$  at  $V_c = 3.1$  км/ч and its cross-section

Источник: составлено авторами.

Source: Compiled by the authors.

Оптимальные параметры и режимы работы универсальной гидросеялки по коэффициенту вариации шага посева: частота вращения мешалки – 87 мин<sup>-1</sup>; величина открытия крана – 56 %; скорость сеялки – 2,7 м/с при вариации шага посева 15 %.

**Обсуждение и заключение.** Авторами настоящего исследования предложена конструктивно-технологическая схема универсальной гидравлической сеялки, позволяющая высевать различные овощные культуры с проклевнувшимися ростками в условиях открытого и закрытого грунта.

С помощью проведения теоретических исследований были получены выражения, описывающие зависимость величины средней окружной скорости потока посевной смеси, а также величину мощности при работе резервуара для формирования посевной смеси при различных сочетаниях конструктивных и режимных параметров. В процессе работы резервуара для формирования посевной смеси при одинаковых оборотах мешалки и увеличения радиуса  $R_{рез}$  с 0,1 до 0,6 м потребная мощность  $N$  на привод возрастает в 7 800 раз.

Получена аналитическая зависимость, описывающая величину концентрации семян в несущей среде в заданный момент времени на фиксированной точке высоты резервуара. В работе резервуара для формирования посевной смеси при объемной доле семян в смеси  $C_V = 0,02$ , радиусе резервуара  $R_{рез} = 0,2$  м, высоте резервуара  $H_{рез} = 0,6$  м, отражающих перегородок высотой  $H_{оп.п.} = 0,4$  м, вязкости несущей среды  $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3}$  Па·с, плотности семян  $\rho_{сем} = 120$  кг/м<sup>3</sup>, увеличении числа оборотов мешалки с 70 до 130 мин<sup>-1</sup> потребное время для достижения равномерной концентрации семян уменьшается с 64 до 10 с.

Предложенные в статье параметры и режимы работы гидросеялки для посева овощных культур могут быть использованы конструкторскими организациями при разработке серийных сеялок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование работы элементов конструкции гидросеялки для посева овощных культур / Е. В. Труфляк [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 116. С. 943–956. EDN: VQUVUL
2. Изучение работы высевающего аппарата гидросеялки / Е. В. Труфляк [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 116. С. 910–927 EDN: VQUVTH
3. Винецкий Е. И., Дьячкин И. И., Маслов Г. Г. Машинные технологии и комплексы технических средств для производства табака // Сборник научных трудов всероссийского научно-исследовательского института табака, махорки и табачных изделий. 2009. № 178. С. 284–292. EDN: RCUEWJ
4. Винецкий Е. И., Науменко А. Г., Пестова Л. П. Параметры устройства для обеспечения постоянного расхода жидкости в сеялке для рядкового посева семян рассадных культур гидравлическим способом // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 141. С. 19–29. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-141-003>
5. Теоретико-экспериментальное обоснование режимов процесса гидравлического посева семян рассадных культур в почву / Е. И. Винецкий [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 159. С. 348–356. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-159-024>
6. Винецкий Е. И., Пестова Л. П., Науменко А. Г. Теоретико-экспериментальные основы процесса рядкового посева семян гидравлическим способом // Сборник научных трудов всероссийского научно-исследовательского института табака, махорки и табачных изделий. 2019. № 182. С. 234–244. EDN: WLTVQT
7. Лазаренко Я. С., Цепляев А. Н. Теоретическое определение скорости перемещения семени в гидروпневматическом высевающем аппарате // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2013. № 4 (32). С. 232–236. URL: <https://volgau.com/izvestiya> (дата обращения: 01.09.2023).

8. Цепляев А. Н., Лазаренко Я. С. Посев пророщенных семян // Сельский механизатор. 2012. № 8. С. 12–13. EDN: RDUFLX
9. Сялка для рядкового высева семян : патент 2530497 Российская Федерация / Труфляк Е. В., Яркин Д. С., Яркин С. С. № 2013119350/13 ; заявл. 25.04.2013 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28. 6 с.
10. Труфляк Е. В., Курченко Н. Ю., Яркин Д. С. Изучение гидропосева овощных культур с применением электроактивированной воды // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 96. С. 66–79. EDN: TYPFDX
11. Посев семян овощных культур и табака гидравлическим способом с использованием электроактивированной воды / Е. В. Труфляк [и др.] // Техника и оборудование для села. 2015. № 1. С. 10–13. EDN: THYNER
12. Ручная однорядная гидравлическая сялка : патент 2287924 Российская Федерация / Яворский В. В., Иваненко В. П., Яворская В. В. № 2004134533/12 ; заявл. 26.11.2006 ; опубл. 26.11.2004, Бюл. № 13. URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2287924> (дата обращения: 01.09.2023).
13. Гидросялка : патент 1026679 СССР / Александрян К. В. [и др.]; заявл. 26.03.1982 ; опубл. 07.07.1983. URL: <https://patenton.ru/patent/SU1026679A1> (дата обращения: 01.09.2023).
14. Гидропневматическое посевное устройство : патент 2536932 Российская Федерация / Раднаев Д. Н., Прокопьев С. Н., Абидуев А. А. ; заявл. 06.05.2013 ; опубл. 27.12.2014. URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2536932> (дата обращения: 01.09.2023).
15. Гидравлическая сялка : патент 2028744 Российская Федерация / Подолько Н. М., Красковский В. Н. ; заявл. 09.10.1991 ; опубл. 20.02.1995. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2028744C1> (дата обращения: 01.09.2023).
16. Высевающий аппарат : патент 2275784 Российская Федерация / Абеин В. Г. [и др.]. № 2004135620/12 ; заявл. 06.12.2004 ; опубл. 10.05.2006. URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2275784> (дата обращения: 01.09.2023).
17. Дисковолочечный высевающий аппарат для посева проросших семян овощных культур : патент 113449 Российская Федерация / Цепляев А. Н., Лазаренко Я. С., Харлашин А. В. №2010132494/13 ; заявл. 02.08.2010 ; опубл. 20.02.2012. URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU113449U1\\_20120220.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU113449U1_20120220.pdf) (дата обращения: 01.09.2023).
18. Насадок для распределения пленкообразующих эмульсий : патент 3263 Республика Беларусь / Кондратьев В. Л., Карловский В. Ф., Самбурский Г. А. № 960337 ; заявл. 02.07.1996 ; опубл. 30.03.2000. URL: <https://bypatents.com/4-3263-nasadok-dlya-raspredeleniya-plenkoobrazuyushhih-emulsijj.html> (дата обращения: 01.09.2023).
19. Bansal P. Parametric Analysis & Design Structure of Hydraulic Seed System // International Journal for Multidisciplinary Research. 2023. Vol. 5, Issue 3. 7 p. URL: <https://clck.ru/3Ampun> (дата обращения: 01.09.2023).
20. Study of Seed Agitation in the Fluid of a Hydropneumatic Precision Seeder / V. Pastukhov [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 5 (1–107). P. 36–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212517>
21. Shandong Y. Experimental Research on Hydro-Jet Seed Device // 2011 International Conference on New Technology of Agricultural. 2011. P. 207–211. <https://doi.org/10.1109/ICAET.2011.5943785>
22. Parsakhoo A., Jajouzadeh M., Motlagh A. R. Effect of Hydroseeding on Grass Yield and Water use Efficiency // Journal of Forest Science. 2018. № 64. P. 157–163. <https://doi.org/10.17221/2/2018-JFS>

## REFERENCES

1. Truflyak E.V., Skorobogachenko I.S., Saprykin V.Yu, Truflyak I.S. Research of Work of the Design Elements of a Hydroseeder for Crops of Vegetable Cultures. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;(116):943–956. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VQUVUL
2. Truflyak E. V., Skorobogachenko I. S., Saprykin V. Yu, Truflyak I. S. Study of Work of Sowing Apparatus of a Hydroseeding Device. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;(116):910–927. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: VQUVTH
3. Vinevskiy E.I., Dyachkin I.I., Maslov G.G. [Machine Technologies and Complexes of Technical Means for Tobacco Production] // *Collection of Scientific Papers of the All-Russian Research Institute of Tobacco, Mahorka and Tobacco Products*. 2009;(178):284–292. (In Russ.) EDN: RCUEWJ

4. Vinevsky E.I., Naumenko A.G., Pestova L.P. Parameters of a Device for Maintaining Constant Flow of Liquid In A Hydraulic Row Sowing Machine for Seedling Plants. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2018;(141):19–29. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-141-003>
5. Vinevsky E.I., Trubilin E.I., Naumenko A.I., Naumenko A.G., Pestova L.P. Theoretical and Experimental Substantiation of the Process Modes of Hydraulic Seeding of Seedling Crops in the Soil. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2020;(159):348–356. (In Russ., abstract in Eng.) <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-159-024>
6. Vinevsky E.I., Pestova L.P., Naumenko A.G. [Theoretical and Experimental Basis of the Process of Row Sowing of Seeds by Hydraulic Method]. *Collection of Scientific Papers of the All-Russian Research Institute of Tobacco, Mahorka and Tobacco Products*. 2019;(182):234–244. (In Russ.) EDN: WLTVQT
7. Lazarenko Ya.C., Tseplyaev A.N. [Theoretical Determination of the Speed of Seed Movement in a Hydropneumatic Sowing Machine]. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2013;(4):232–236. (In Russ.) Available at: <https://volgau.com/izvestiya> (accessed 01.09.2023).
8. Tseplyaev A.N., Lazarenko Ya.C. [Sowing of Germinated Seeds]. *Selskiy Mechanizator*. 2012;(8):12–13. (In Russ.) EDN: RDUFLX
9. Truflyak E.V., Yarkin D.D., Yarkin S.S. [Seed Drill for Row Seeding]. Patent 2,530,497 Russian Federation. 2014 October 10. (In Russ.)
10. Truflyak E.V., Kurchenko N.Y., Yarkin D.S. Study of Vegetable Crops Hydroseeding With the Application of Electroactivated Water. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;(96):66–79. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TYPFDX
11. Truflyak E.V., Vinevsky E.I., Kurchenko N.Y., Skorobogachenko I.C. Sowing of Vegetable Crops and Tobacco Hydraulically Using Electro-Activated Water. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2015;(1):10–13. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: THYNER
12. Yavorsky V.V., Ivanenko V.P., Yavorskaya V.V. [Manual Single-Row Hydraulic Seeder]. Patent 2,287,924 Russian Federation. 2006 November 26. (In Russ.) Available at: <https://www.freepatent.ru/patents/2287924> (accessed 01.09.2023).
13. Alexandryan K.V., Gasparyan A.A., Melikyan K.G., Grigoryan S.A. [Hydroseeder]. Patent 1,026,679 USSR. 1983 July 07. (In Russ.) Available at: <https://patenton.ru/patent/SU1026679A1> (accessed 01.09.2023).
14. Radnaev D.N., Prokopyev S.N., Abiduev A.A. [Hydropneumatic Seeding Device]. Patent 2,536,932 Russian Federation. 2014 Desember 27. (In Russ.) Available at: <https://www.freepatent.ru/patents/2536932> (accessed 01.09.2023).
15. Podolko H.M., Kraskovskiy V.N. [Hydraulic Seeder]. Patent 2,028,744 Russian Federation. 1995 February 20. (In Russ.) Available at: <https://patenton.ru/patent/RU2028744C1> (accessed 01.09.2023).
16. Abein V.G., Karpunin V.V., Tseplyaev A.N., Abezin D.A., Shaprov M.N., Saldaev A.M. [Seeding Apparatus]. Patent 2,275,784 Russian Federation. 2006 May 10. (In Russ.) Available at: <https://www.freepatent.ru/patents/2275784> (accessed 01.09.2023).
17. Tseplyaev A.N., Lazarenko Y.S., Kharlashin A.V. [Disk-Hair Sowing Machine for Sowing Germinated Seeds of Vegetable Crops]. Patent 113,449 Russian Federation. 2012 February 20. (In Russ.) Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU113449U1\\_20120220.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU113449U1_20120220.pdf) (accessed 01.09.2023).
18. Kondratyev V.L., Karlovsky B.F., Sambursky G.A. [Nozzle for Distribution of Film-Forming Emulsions]. Patent 3263 Republic of Belarus. 2000 March 30. (In Russ.) Available at: <https://bypatents.com/4-3263-nasadok-dlya-raspredeleniya-plenkoobrazuyushhih-emulsijj.html> (accessed 01.09.2023).
19. Bansal P. Parametric Analysis & Design Structure of Hydraulic Seed System. *International Journal for Multidisciplinary Research*. 2023;5(3):7. Available at: <https://clck.ru/3Ampun> (accessed 01.09.2023).
20. Pastukhov V., Boiko V., Tesliuk H., Ulexin V., Kyrchenko R. Study of Seed Agitation in the Fluid of a Hydropneumatic Precision Seeder. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020;5(1):36–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212517>
21. Shandong Y. Experimental Research on Hydro-Jet Seed Device. *2011 International Conference on New Technology of Agricultural*. 2011:207–211. <https://doi.org/10.1109/ICAE.2011.5943785>
22. Parsakhoo A., Jajouzadeh M., Motlagh A.R. Effect of Hydroseeding on Grass Yield and Water use Efficiency. *Journal of Forest Science*. 2018;(64):157–163. <https://doi.org/10.17221/2/2018-JFS>

*Об авторах:*

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

**Скоробогаченко Иван Сергеевич**, преподаватель-исследователь Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9293-6200>, [ivan-sk2008@yandex.ru](mailto:ivan-sk2008@yandex.ru)

**Коновалов Владимир Иванович**, доцент кафедры процессов и машин в агробизнесе Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2740-2010>, [konovalov.v.i@mail.ru](mailto:konovalov.v.i@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

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

И. С. Скоробогаченко – обзор литературы, участие в экспериментальных исследованиях.

В. И. Коновалов – теоретические исследования.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Поступила в редакцию 26.01.2024; поступила после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 20.02.2024

*About the authors:*

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

**Ivan S. Skorobogachenko**, Research Teacher, Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9293-6200>, [ivan-sk2008@yandex.ru](mailto:ivan-sk2008@yandex.ru)

**Vladimir I. Konovalov**, Associate Professor, Department of Processes and Machines in Agribusiness, Kuban State Agrarian University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2740-2010>, [konovalov.v.i@mail.ru](mailto:konovalov.v.i@mail.ru)

*Authors contribution:*

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

I. S. Skorobogachenko – literature review, participation in experimental studies.

V. I. Konovalov – theoretical research.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

Submitted 26.01.2024; revised 08.02.2024; accepted 20.02.2024

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ /  
INSTRUMENTS AND METHODS  
OF EXPERIMENTAL PHYSICS**

Оригинальная статья / Original article  
УДК 620.192.63

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402.265-280



**Identification of Defects in Products Made  
from Honeycomb Composite Materials Using  
Infrared Scanning Thermography**

**D. Yu. Golovin<sup>a</sup>, A. G. Divin<sup>a, b</sup>, A. A. Samodurov<sup>a</sup>,  
Yu. A. Zaharov<sup>a, b</sup>, A. I. Tyurin<sup>a</sup>, Yu. I. Golovin<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Derzhavin Tambov State University (Tambov, Russian Federation)*

<sup>b</sup> *Tambov State Technical University (Tambov, Russian Federation)*

✉ [nano@tsutmb.ru](mailto:nano@tsutmb.ru)

**Abstract**

*Introduction.* Recently, sandwich-structured composite materials based on honeycomb core and strong thin shells have become widespread.

However, these materials are characterized by manufacturing and operational flaws such as “non-gluing” and “delamination” that is the breaking of the bonds between the shell and the honeycomb core that result in the deterioration in the mechanical, acoustic and thermal properties of the material.

*Aim of the Study.* The study is aimed at developing effective methods for detecting flaws in gluing shell with comb core in honeycomb polymer materials.

*Materials and Methods.* The article describes a method for detecting these flaws using scanning thermography with a linear heat source, based on the estimation and subsequent analysis of the distribution of local temperature field gradients on the product surface.

*Results.* The experiments were carried out on a model polymer specimen with an embedded artificial flaw; there were shown the main sources of emerging noise, control errors, and the ways to reduce their influence; a numerical method for assessing the accuracy of the flaw measurement method was proposed.

*Discussion and Conclusion.* Tests carried out on a control specimen showed that the proportion of errors in measuring a defect does not exceed 12%.

**Keywords:** scanning thermography, non-destructive testing, composite materials, honeycomb core, flaw detection, delamination

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

**Funding:** The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 20-19-00602 using the equipment of the Center for Collective Use of Derzhavin Tambov State University and the Center for Collective Use “Robotics” of Tambov State Technical University.

© Golovin D. Yu., Divin A. G., Samodurov A. A., Zaharov Yu. A., Tyurin A. I., Golovin Yu. I., 2024



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



*For citation:* Golovin D.Yu., Divin A.G., Samodurov A.A., Zaharov Yu.A., Tyurin A.I., Golovin Yu.I. Identification of Defects in Products Made from Honeycomb Composite Materials Using Infrared Scanning Thermography. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):265–280. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.265-280>

## Идентификация дефектов изделий из сотовых композиционных материалов методом инфракрасной сканирующей термографии

Д. Ю. Головин<sup>1</sup>, А. Г. Дивин<sup>1,2</sup>, А. А. Самодуров<sup>1</sup>,  
Ю. А. Захаров<sup>1,2</sup>, А. И. Тюрин<sup>1</sup>, Ю. И. Головин<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Тамбовский государственный университет

имени Г. Р. Державина

(г. Тамбов, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Тамбовский государственный технический университет

(г. Тамбов, Российская Федерация)

✉ [nano@tsutmb.ru](mailto:nano@tsutmb.ru)

### Аннотация

*Введение.* В последнее время получили широкое распространение сэндвич-структурированные композиционные материалы на основе сотовых наполнителей в тонкой, но прочной оболочке. К сожалению, для таких материалов характерно образование производственных и эксплуатационных дефектов типа «непроклей» и «отслоение», заключающихся в нарушении связей между обшивкой и сотовым наполнителем, приводящих к ухудшению механических, акустических и тепловых свойств материала.

*Цель исследования.* Целью статьи является разработка эффективных методов обнаружения дефектов клевого соединения обшивки с сотовым наполнителем сэндвича. *Материалы и методы.* В работе описан способ обнаружения дефектов при помощи сканирующей термографии с линейным источником тепла, основанный на вычислении и последующем анализе распределения локальных градиентов температурного поля на поверхности изделия.

*Результаты исследования.* Проведены эксперименты на модельном полимерном образце с заложенным искусственным дефектом, показаны основные источники возникающих шумов и ошибок контроля, способы снижения их влияния, предложен численный способ оценки точности метода определения дефекта.

*Обсуждение и заключение.* Проведенные на контрольном образце испытания показали, что доля ошибок при определении дефекта не превышает 12 %.

**Ключевые слова:** инфракрасная термография, неразрушающий контроль, композиционные материалы, сотовый наполнитель, дефектоскопия, дефект

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00602 с использованием оборудования ЦКП Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина и ЦКП «Робототехника» Тамбовского государственного технического университета.

**Для цитирования:** Идентификация дефектов изделий из сотовых композиционных материалов методом инфракрасной сканирующей термографии / Д. Ю. Головин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 265–280. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.265-280>

**Introduction.** The development of modern technology is impossible without the introduction of materials that meet the highest requirements for strength, rigidity and reliability. Such materials include composites with an internal honeycomb core and an external shell made of a polymer composite material glued to it. Honeycomb structures can be made from various types of metallic<sup>1</sup> [1; 2] and non-metallic materials [3], such as aluminum alloy [5–6], stainless steel [7; 8], Nomex [9; 10], craft paper [11; 12] and glass fiber [13; 14]. There are widely used honeycomb composites in which the filler (plastic polymer) is made of aramid paper impregnated with phenolic resins, resulting in the formation of a honeycomb hexagonal thin-walled structure.

Their superior physical, mechanical and other structural properties such as low density, corrosion resistance, fire resistance, good thermal insulation and high compressive strength, and good fatigue strength make aramid paper honeycomb composites the base material to make details for aerospace, automotive (race car), high-speed railway and shipbuilding industries, and for the parts of sport equipment and safety helmet. In the aircraft industry, honeycomb composites are used primarily for floors, doors, flaps, wing fairings, rudders, overhead storage compartments, ceilings, sidewall panels, engine cowlings, spoilers, nacelles and fairings.

However, in manufacturing of the products from these materials and during their operation, there may be formed such flaws as “non-gluing” and “detachment” that is the breaking of bonds between the shell and honeycomb. These flaws reduce the strength and rigidity of materials that increases the risk of destruction of the product during its operation and makes the procedure for flaw detection of these materials in demand.

Currently, ultrasonic testing is used as the main method for detecting flaws in honeycomb composites. However, the sandwich structures of these materials are characterized by rapid attenuation of ultrasonic waves with frequencies above 1 MHz, which significantly complicates the use of traditional ultrasonic methods. Therefore, new ones are being actively developed, including vibrational acoustic-ultrasonic methods operating at a frequency of less than 100 kHz, and methods based on the use of phased arrays. In addition to ultrasonic testing methods, X-ray<sup>2</sup>, impedance methods and classical methods of free vibrations (tapping) [15] are used.

Each of these methods has its own characteristics and it is advisable to use a set of methods for the reliable flaw detection. For example, to identify subsurface flaws such as shell “detachment” or “non-gluing”, it is advisable to use active scanning thermography methods, which have proven themselves to be universal, high-performance, safe, visual and easy to implement [16; 17]. These methods are based on the use of a heat source acting on the test object and further dynamic recording of the temperature field of the product surface. Anomalies in the distribution of the temperature field indicate a violation of the material structure, including the presence of the above-mentioned defects in it<sup>3</sup>. However, honeycomb composites, by definition, are inhomogeneous in structure

<sup>1</sup> Price T.L., Dalley G., McCullough P.C., Choquette L. Handbook: Manufacturing Advanced Composite Components for Airframes. USA: Federal Aviation Administration, Office of Aviation Research; 1997. 226 p. Available at: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA325978.xhtml> (accessed 06.10.2023).

<sup>2</sup> ASTM E2662-15. Standard Practice for Radiographic Examination of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications. Book of Standards Volume: 03.04. 2015 June 1. 6 p. <https://doi.org/10.1520/E2662-15>

<sup>3</sup> Golovin D. Yu., Tyurin A.I., Samodurov A.A., Divin A.G., Golovin Yu.I. [Dynamic Thermographic Methods of Non-Destructive Express Control]. Moscow: Technosfera; 2019. 214 p. (In Russ.) EDN: NATIX  
*Instruments and methods of experimental physics* 267

and therefore the temperature field on their surface during active thermal control is also inhomogeneous. For this reason, it is necessary to develop more complex mathematical models, methods and algorithms that make it possible to reliably identify such flaws as “non-gluing” or “detachment” using primary data obtained in the experiment.

**Literature Review.** The active thermography method can be applied to a greater class of materials than many other traditional quality control methods, such as radiation testing, ultrasonic testing, eddy current testing, capillary testing, etc. [18–20]. It can be applied to both metals and non-metals containing subsurface flaws such as cracks, foreign inclusions, peeling, delamination, etc.

Due to the advantage of inspecting a large area in one test, the infrared thermography is widely used for non-destructive testing of detachment flaws in honeycomb composites. Various sources of thermal excitation can be used depending on the types of flaws and types of materials. In solid polymer composite materials, the ultrasonic infrared thermography can be used [7], which makes it possible to determine the characteristics of small flaws, “closed” flaws, etc. [21]. To identify these flaws, the method of electric force thermography is also used [22]. The microwave thermography [8] has a good thermal effect on ceramic and wooden products. The eddy current thermography is used for metal products. Compared with other thermal excitation methods, the optical excitation is the simplest and most practical one. IR pulse thermography is a universal method for detecting flaws [10–12]; however, it should be taken into account that when the heat source (for example, a quartz lamp) is turned off, the inevitable effects of infrared afterglow will influence the experimental results [11].

Depending on the geometric shape of the thermal influence zone of the test object, one can distinguish:

- point-scanning, when the heating of an object is limited to a circle-shaped area of a known diameter with uniform surface rating and simultaneous moving along the object surface at a given speed and along a given trajectory [23];
- linear scanning, which is heating an object along a segment of a given length during the object movement perpendicular to this segment at a given speed [24];
- continuous heating, when a large area of the test object is exposed to heat that ensures rapid testing.

The disadvantage of continuous heating is that it is difficult to ensure uniform heating all over the surface of the test object, especially if the latter has a curved surface. Spot heating with a laser makes it possible to examine the product curved surface, but the performance of this method leaves much to be desired.

A compromise is the linear scanning method, which provides high performance and enables to examine surfaces with one-dimensional curvature. However, for honeycomb composites, the development of algorithms for identifying defective regions with shell delamination remains relevant.

**Materials and Methods.** For the experiments, a rectangular specimen with dimensions of (102×102×12) mm was used. The specimen imitated a fragment of a honeycomb panel and consisted of two parts: a polymer honeycomb core and a shell glued to it. The honeycomb core was made by photopolymer 3D printing from the photopolymer Anycubic 3D Printing UV Sensitive Resin Basic produced by Shenzhen Anycubic

Technology Co., Ltd (Shenzhen, China). The 3D printer Saturn 2, manufactured by Elegoo (Shenzhen, China), was used to print. This printer is equipped with an 8K UV display, which allows printing with a horizontal resolution of 28.5 microns. Vertical resolution was 1.25 microns.

The honeycomb core is a honeycomb structure with through hexagonal cells located periodically. The dimensions of the area with cells were (100×100) mm, along the perimeter of the area with cells there was a rim of 1 mm thick. The height of the filler was 10 mm. The distance between the parallel walls of one honeycomb was 4.8 mm, the wall thickness was 0.2 mm. To simulate a delamination defect a rectangular recess with a size of (20.2×20.2) mm and a depth of 0.25 mm was made in the array of honeycomb filler cells. The indentation was built into the digital model before printing and was completed by the printer. The depth was checked using a Veeco NT 9080 profilometer and was 0.259 mm.

A fragment of fiberglass STEF GOST 12652–74 with a thickness of 0.5 mm and dimensions of (102×102) mm was used as a shell. To increase the absorption and emission coefficients of the specimen surface and prevent it from being heated in depth by radiation, its surface was painted with the matte black paint “Monarca 21200 Black” sprayed from a spray can. The thickness of the paint layer was less than 0.02 mm.

To record thermal films, there was developed an installation consisting of a three-coordinate portal-type base from a MP7 milling machine with numerical control manufactured by Purelogic (Russia, Voronezh). A heater was attached to the machine portal. At the end of the machine table, there was a support for mounting an infrared (IR) camera (hereinafter referred to as a thermal imager), which allows recording the dynamics of changes in the temperature field.

The heater was made of the Thermika 1000 W 235 V 355/272 mm SK15 reflector IR lamp placed in the reflector housing. The lamp power consumption was 1 kW. The glass bulb of the lamp had the shape of a cylinder with a diameter of 11 mm with an emitting spiral length of 272 mm. The total length of the lamp was 355 mm. The reflector housing was made of a piece of aluminum profile – a rectangular pipe measuring 40×20 mm, with a wall thickness of 1 mm, and a length of 355 mm corresponding to the overall length of the IR lamp. The housing had a 6 mm wide slot along its entire length. The housing was designed to distribute IR radiation from the lamp along the heating spot, which was a line located perpendicular to the direction of movement during scanning, provided for by the concept of active scanning thermography with a linear source.

For the installation there was used a COX CG640-G20 thermal imager manufactured by COX (South Korea, Seoul). The thermal imager used a ULIS detector – an uncooled microbolometer matrix with a resolution of (640×480) pixels. The temperature sensitivity of the detector was below 50 mK, the perceived wavelength range of IR radiation was (8...14) microns.

When recording thermal films, the specimen was placed on the installation table. The distance from the heater housing to the specimen surface was 20 mm. The portal with a fixed heater moved relative to the specimen at a speed of 20 mm/s, ensuring heating of the specimen surface to no more than 80 °C. The thermal imager remained motionless. As a result, the records of sequences of thermograms with time stamps, hereinafter referred to as “thermal films”, were obtained. To work with recorded thermal films, we

used original software “Thermal Film Analyzer CRD” and several auxiliary utilities for working with data uploaded using the above application and other auxiliary functions. The developed software was written in the Processing language.

**Results.** For thermographic methods, the flaw is local heterogeneity of thermal physical characteristics. In the case of a honeycomb material, considering a flaw as inhomogeneity is complicated by the inhomogeneous structure of the material itself. In addition, the honeycombs have slightly different sizes and shapes, and therefore the heat removal from the heated surface layer may be uneven and irregular, and much lower than for a solid material. This is due to the fact that the entire volume of the material participates in heat removal from a solid specimen, whereas in the case of a material with a honeycomb core, heat is removed into the material mainly by thin honeycomb walls made of polymer and having low thermal conductivity. Figure 1 shows a fragment of a thermogram of a defect free region of a honeycomb composite material.

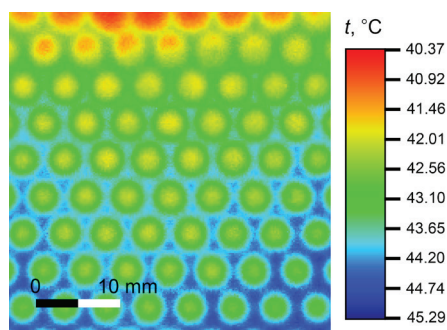


Fig. 1. Thermogram of a composite material section with honeycomb core. “Honeycombs” are clearly visible, appearing due to heat leakage along the walls of the honeycomb deep into the filler

*Source:* Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

During the cooling of the shell in the areas above the honeycomb walls, the temperature at the beginning of the cooling process decreased faster than above the honeycomb centers that leads to the occurrence of a thermal pattern on its surface, reflecting the structure of the honeycomb filler. After some time, the temperature equalized and the honeycombs became invisible again.

The presence of a cell wall in contact with the housing manifested itself in the occurrence of a local temperature minimum. The “detachment” flaw is characterized by poorer (or even absent) contact between the honeycomb walls and the shell. Hence, the task of detecting a flaw can be considered as the task of searching for honeycombs under the top layer of material. Thus, when a flaw became visible, the development of a numerical criterion for its detection was reduced to the problem of feature engineering. Due to heat leakage into the walls of the honeycomb, there were lateral heat flows on the surface of the material, the magnitude of which at a point corresponds to the magnitude of the gradient. Accordingly, the temperature gradient on the surface in the defect free area should be higher than in the area over delamination.

To verify this assumption, there was selected a thermal film frame immediately following after the heater output of the flaw area. Using specialized software, the gradient



values in the frame were calculated. The gradient for each point was calculated on a circular area with a radius of 6 pixels. This radius was chosen so that the gradient calculation area corresponded to the size of the area of monotonic temperature change, which made it possible to estimate the temperature gradient created by heat leakage into the nearest wall. Since the gradient was proportional to this leakage, and the amount of leakage depended on the flaw presence, the gradient can be used to determine flaw in the area of a selected point. In this case, gradients along the  $x$  and  $y$  axes were calculated as the coefficient of linear regression of temperature on the corresponding coordinate. This approach suppresses the noise, since each coefficient results from processing many pixels. Using the linear regression coefficients of temperature from  $x$  and  $y$ , the gradient magnitude and its direction (i.e., the polar coordinates of the gradient vector) were calculated. Figure 2 shows the obtained results.

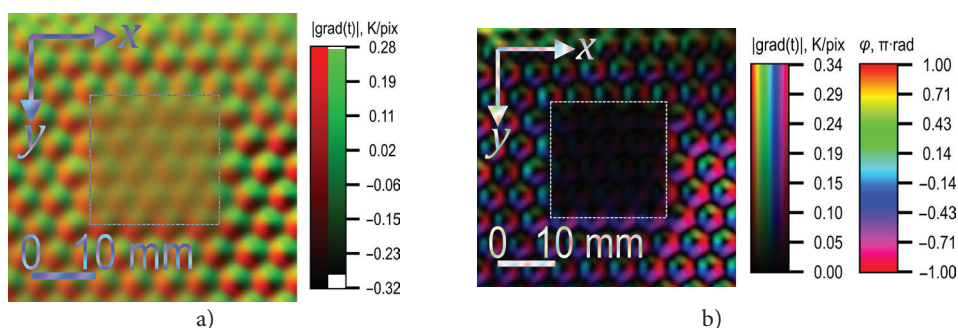


Figure 2. Distribution of gradients in the defective area and its surroundings:

a) in rectangular coordinates, the red component is  $x$ , the green component is  $y$ ; b) in polar coordinates, color saturation is the value, color tone is the direction; the defective area is shown by a dotted square

The above images clearly show that the magnitude of both the gradient components along two axes and the length of the gradient vector in the defective area were on average lower than in the defect free area. To numerically evaluate this effect on a selected fragment of a thermal film frame, a line was selected that was close to the centers of the cells (Fig. 3).

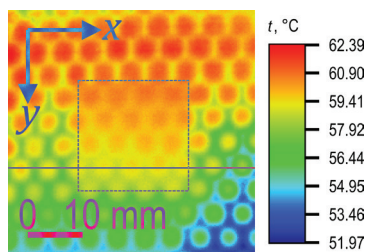


Figure 3. Thermogram of the defective region and its surroundings.

The defective area is shown by a dotted square; the selected section is shown by a line

The gradient was calculated in a sliding window 13 pixels wide, which corresponded to the length of the section of monotonic temperature change associated with heat leakage



into the cell walls. The temperature on the line and the temperature gradient along it are shown in Figure 4.

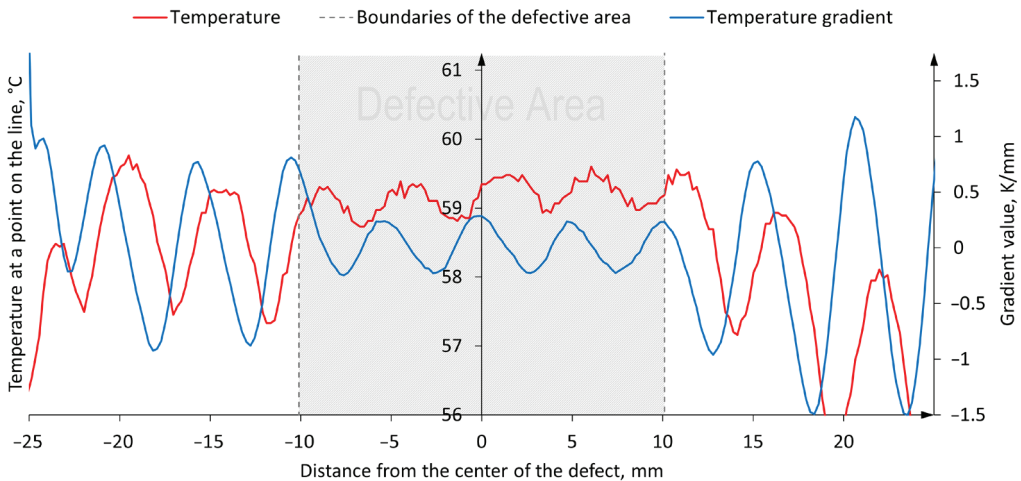


Fig. 4. Values of temperature on the selected line and temperature gradient on the selected line along it

The average amplitude of the gradient in the defect free area was 1.91 K/mm, in the defective area it was 0.47 K/mm, which was 4.01 times lower. This amplitude discrepancy made it possible to use the temperature gradient as a criterion for flaw identification. Since the reason for the difference in gradients in the defective and defect free areas was different heat leakage into the walls of the honeycomb, the gradient should be calculated in a area that coincides in size with the value of the monotonic dependence of temperature on the coordinate. This size was the distance from the wall to the center of the cell, i.e., half the center-to-center distance of cells having a common wall. However, the value of the gradient was not constant: for points corresponding to the center of the cell or the middle of the wall, the gradient took a near-zero value, i.e., in terms of the gradient value at these points, the defective and flawless areas were indistinguishable. The discrimination problem can be solved by comparing the gradient values at points between the center and the wall, but this required an additional algorithm for searching and identifying cells. Therefore, it was advisable to introduce such an informative parameter by which one can judge the presence or absence of a flaw at each point of the observed surface, without reference to the elements of the honeycomb structure. One of the ways to do this is to use the sliding average of the absolute value of the gradient as an informative parameter for the presence or absence of a flaw at a point. As a sample implementation, a moving average of the gradient was calculated on the data shown in Figure 4 in the window which width was equal to the center-to-center distance of the cells. The distribution graph of the obtained parameter value is shown in Figure 5.

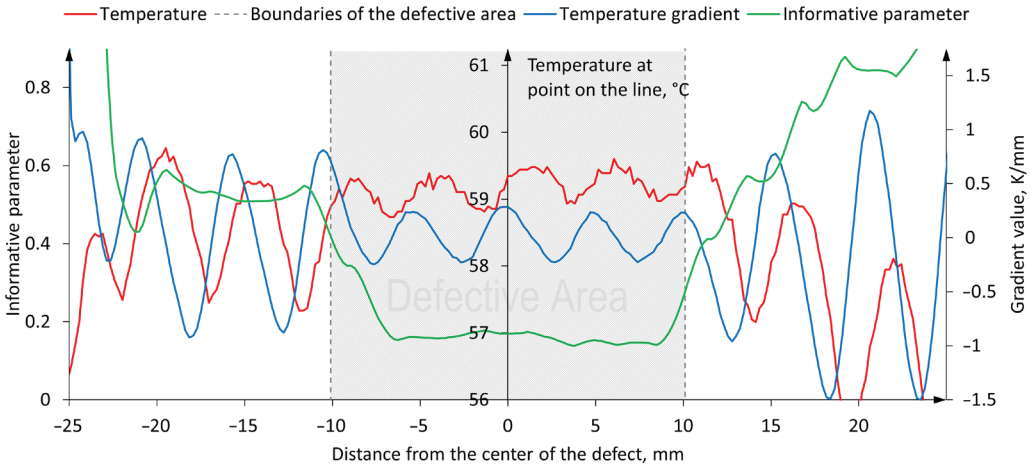


Fig. 5. Distribution of an informative parameter over a selected segment

The graph (Fig. 5) clearly shows that the selected informative parameter had a lower value in the defective area. However, the choice of a specific threshold value that would allow reliable defect detection was impossible without additional processing. Therefore, it was necessary to calculate the gradient value over a larger number of pixels and take measures to reduce the noise inherent to the method.

A way to use more pixels was the calculation of the gradient not along the section line, but around the area. However, if the gradient was not calculated on a line perpendicular to the walls, the gradient component in one direction was not sufficient. Therefore, the vector length for the neighborhood of each point was calculated. A visualization of the result is shown in Figure 6.

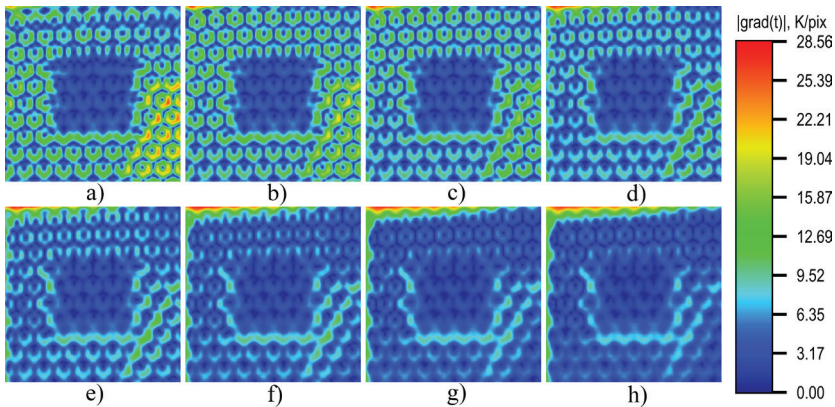


Fig. 6. Calculation of the absolute value of the gradient in the defective area and its surroundings at different times after heating: a) 0 s; b) 1 s; c) 2 s; d) 3 s; e) 4 s; f) 5 s; g) 6 s; h) 7 s

The informative parameter had a lower value in the defective area, however, developing a threshold value that allowed, without additional processing, separating the

defective and defect free areas with satisfactory accuracy was impossible, because the defective and defect free areas had too large portions of the areas in which the value of the selected informative parameter was similar. When developing a criterion, it was necessary to reduce the probability of errors of the first and second types as much as possible (Table).

Table

**Errors of the first and second type in defect detection**

Area	Flaw found	No flaw found
Defect free	Error of the first type ( $\alpha$ error, false positive conclusion)	Correct operation
Defective	Correct operation	Error of the second type ( $\beta$ error, false negative conclusion)

Source: Compiled by the authors.

To reduce the likelihood of such errors, the minimum average risk criterion (Bayes criterion) was chosen. When applying the Bayes criterion, there must be some parameter indicating whether a point belongs to a defective or defect free area, a threshold value of this parameter and the area under the probability density curves of this parameter for the defective and defect free area.

To estimate the change of thermal flow in defect area the simplest informative parameter, calculated as a moving average of the absolute value of the surface temperature gradient can be used.

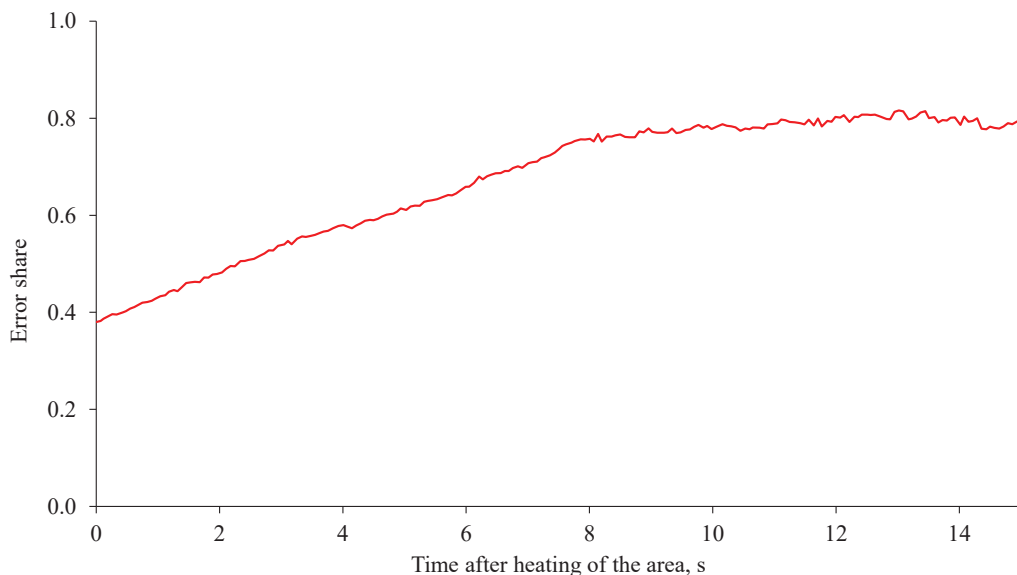


Fig. 7. Sum of Type I and Type II errors probabilities as a function of time after the passage of the heater through the section

As can be seen from the Figure 7, the minimum error value corresponded to the moment immediately after the lamp passes through and was about 38%. This value was quite large that brought the method closer in reliability to random guessing, and therefore

it was necessary to improve the method to reduce the proportion of errors. The distribution curves of the gradient value at the moment of the greatest difference (immediately after the passage of the heater) overlapped significantly (Fig. 8).

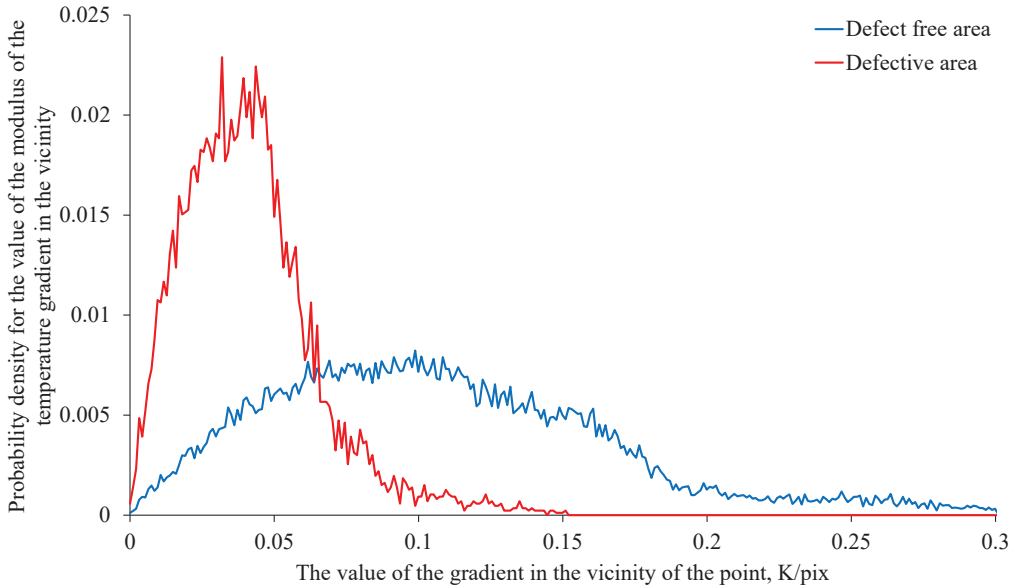


Fig. 8. Weight distribution functions of the gradient modulus

Since the pattern of spatial distribution of the gradient modulus repeats the honeycomb structure, it is proposed to use a moving average taken over a circular area, the size of which corresponds to the minimum repeating pattern of the honeycomb structure, as an informative parameter. Such averaging should lead to a decrease in parameter oscillations with a period corresponding to the cell size. The result of this transformation is shown below in Figure 9.

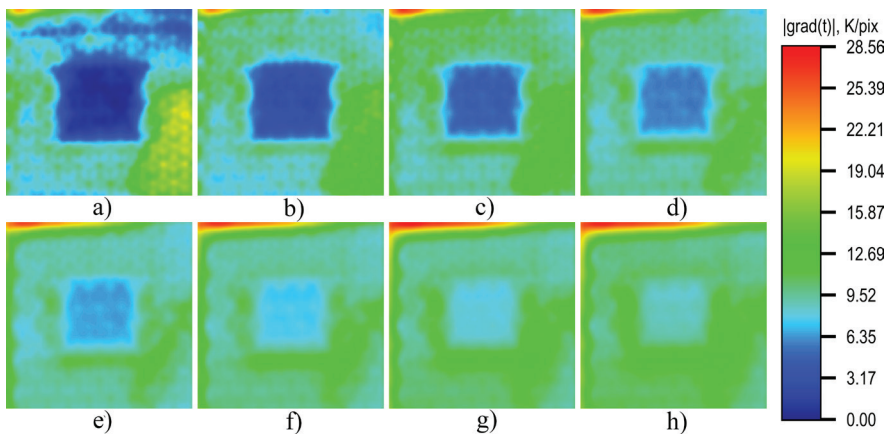


Fig. 9. For each fragment is counted from the moment of complete passage of the heater over the observed region at different times after heating: a) 0 s; b) 1 s; c) 2 s; d) 3 s; e) 4 s; f) 5 s; g) 6 s; h) 7 s

The change in the sum of type I and type II errors for the method is shown in Figure 10. Averaging the result on an area improved the result significantly; the minimum error became 11.8%. The distribution of gradient modules in the defective and defect free areas at the moment of the smallest error and visualization of the gradient distribution for this moment are shown in Figure 11.

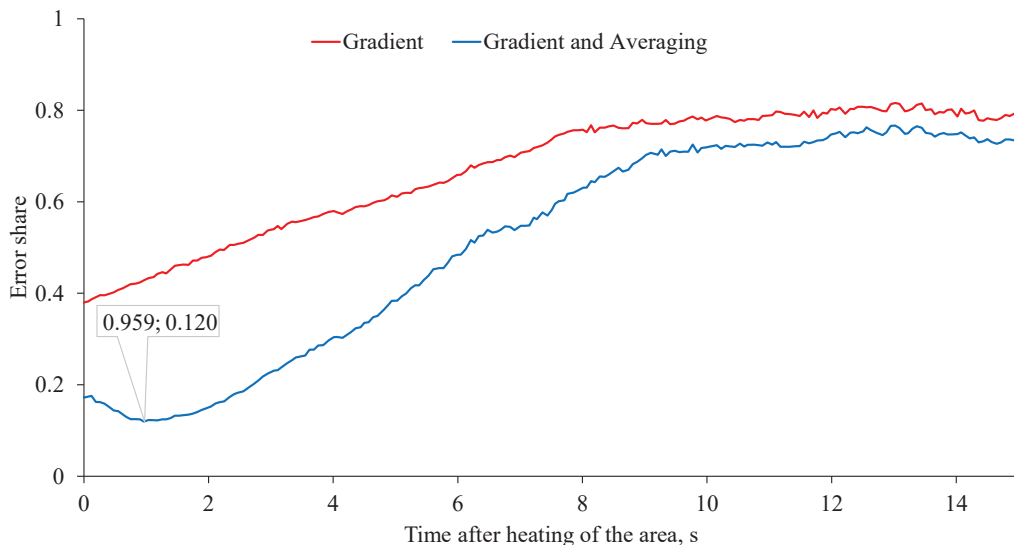


Fig. 10. Error proportion before and after improving the method by introducing averaging

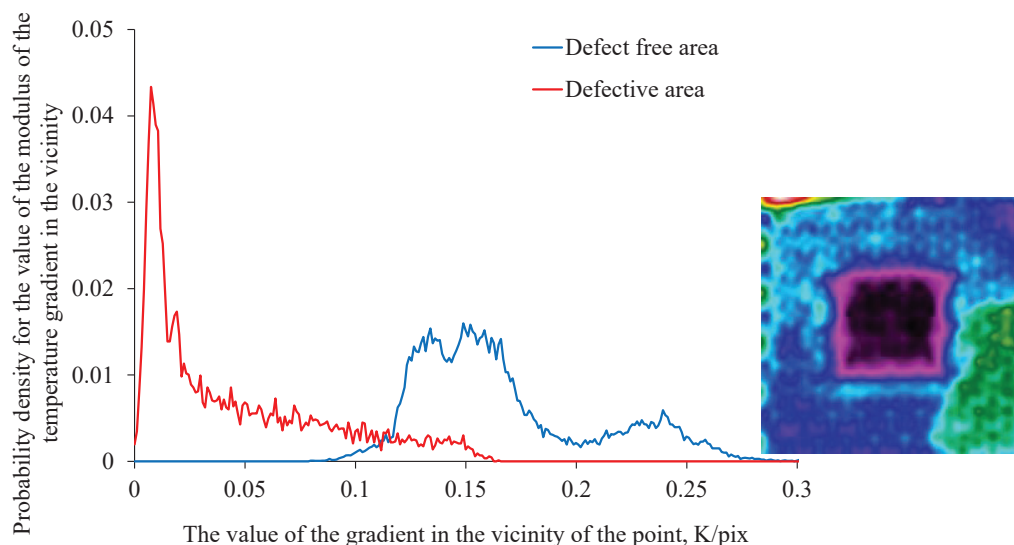


Fig. 11. Distribution of the values of the informative parameter of the improved method in the defective region and its surroundings

**Discussion and Conclusion.** The article discusses a method for identifying flaws in honeycomb polymer composite materials, based on calculating the gradient as an indicator that most closely corresponds to the physical meaning of the difference between heat transfer processes in defective and defect free areas. For the method, possible sources of errors were identified, and methods for compensating them were proposed. As a result of applying an improved version of the developed method, it was possible to classify defective and defect free areas with an error rate of no more than 12%. The method used traditional image processing methods applied in technical vision. This distinguishes the developed method from some of the known ones that use artificial neural networks detect and indentify defects.

The results obtained can be used to create automated systems for identifying flaws in honeycomb polymer materials.

## REFERENCES

1. Ratcliffe J.G., Czabaj M.W., Jackson W.C. A Model for Simulating the Response of Aluminum Honeycomb Structure to Transverse Loading. *15<sup>th</sup> US-Japan Conference on Composite Materials Meeting* 2012;38–53. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120015487/downloads/20120015487.pdf> (accessed 06.10.2023).
2. Heimbs S. Virtual Testing of Sandwich Core Structures Using Dynamic Finite Element Simulations. *Computational Materials Science*. 2009;45(2):205–216. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.09.017>
3. Giglio M., Manes A., Gilioli A. Investigations on Sandwich Core Properties Through an Experimental-Numerical Approach. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43(2):361–374. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.08.016>
4. Yang X., Sun Y., Yang J., Pan Q. Out-of-Plane Crashworthiness Analysis of Bio-Inspired Aluminum Honeycomb Patterned with Horseshoe Mesostructure. *Thin-Walled Structures*. 2018;125:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.014>
5. Liu S., Zhang Y., Liu P. New Analytical Model for Heat Transfer Efficiency of Metallic Honeycomb Structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51(25–26):6254–6258. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.055>
6. Hong S.-T., Pan J., Tyan T., Prasad P. Quasi-Static Crush Behavior of Aluminum Honeycomb Specimens under Non-Proportional Compression-Dominant Combined Loads. *International Journal of Plasticity*. 2006;22(6):1062–1088. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.07.003>
7. Dharmasena K.P., Wadley H.N.G., Xue Z., Hutchinson J.W. Mechanical Response of Metallic Honeycomb Sandwich Panel Structures to High-Intensity Dynamic Loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2008;35(9):1063–1074. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.06.008>
8. Côté F., Deshpande V.S., Fleck N.A., Evans A.G. The Out-of-Plane Compressive Behavior of Metallic Honeycombs. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;380(1–2):272–280. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.03.051>
9. Rodriguez-Ramirez J.de D., Castanie B., Bouvet C. Experimental and Numerical Analysis of the Shear Nonlinear Behaviour of Nomex Honeycomb Core: Application to Insert Sizing. *Composite Structures*. 2018;193:121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.076>
10. Kim G., Sterkenburg R., Tsutsui W. Investigating the Effects of Fluid Intrusion on Nomex® Honeycomb Sandwich Structures with Carbon Fiber Facesheets. *Composite Structures*. 2018;206:535–549. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.054>
11. Chen Z., Yan N. Investigation of Elastic Moduli of Kraft Paper Honeycomb Core Sandwich Panels. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43(5):2107–2114. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.008>
12. Abd Kadir N., Aminanda Y., Ibrahim M.S., Mokhtar H. Experimental Study of Low-Velocity Impact on Foam-Filled Kraft Paper Honeycomb Structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;290:012082. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/290/1/012082>



13. Toribio M.G., Spearing S.M. Compressive Response of Notched Glass-Fiber Epoxy/Honeycomb Sandwich Panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001;32(6):859–870. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00150-0)
14. Shahdin A., Mezeix L., Bouvet C., Morlier J., Gourinat Y. Fabrication and Mechanical Testing of Glass Fiber Entangled Sandwich Beams: A Comparison with Honeycomb and Foam Sandwich Beams. *Composite Structures*. 2009;90(4):404–412. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.003>
15. Bělský P., Kadlec M. Capability of Non-Destructive Techniques in Evaluating Damage to Composite Sandwich Structures. *International Journal of Structural Integrity*. 2019;10(3):356–370. <https://doi.org/10.1108/IJSI-10-2018-0067>
16. Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Mollada J., Bulnes F.G. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors*. 2014;14(7):12305–12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>
17. Golovin Yu.I., Golovin D.Yu., Tyurin A.I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021;2021(4):512–527. <https://doi.org/10.1134/S0036029521040091>
18. Jiao D., Liu Z., Shi W., Xie H. Temperature Fringe Method with Phase-Shift for the 3D Shape Measurement. *Optics and Lasers in Engineering*. 2019;112:93–102. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.09.010>
19. Liu Z., Jiao D., Shi W., Xie H. Linear Laser Fast Scanning Thermography NDT for Artificial Disbond Defects in Thermal Barrier Coatings. *Optics Express*. 2017;25(25):31789–31800. <https://doi.org/10.1364/OE.25.031789>
20. Jiao D., Shi W., Liu Z., Xie H. Laser Multi-Mode Scanning Thermography Method for Fast Inspection of Micro-Cracks in TBCs Surface. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2018;37(2):30. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0485-1>
21. Kaledin V.O., Vyachkina E.A., Vyachkin E.S., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. Applying Ultrasonic Thermotomography and Electric-Loading Thermography for Thermal Characterization of Small-Sized Defects in Complex-Shaped Spatial Composite Structures. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020;56(1):58–69. <https://doi.org/10.1134/S1061830920010052>
22. Budadin O., Razin A., Aniskovich V., Kozelskaya S., Abramova E. New Approaches to Diagnostics of Quality of Structures from Polymeric Composite Materials under Force and Shock Impact Using the Analysis of Temperature Fields. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1636:012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1636/1/012022>
23. Rellinger T., Underhill P.R., Krause T.W., Wowk D. Combining Eddy Current, Thermography and Laser Scanning to Characterize Low-Velocity Impact Damage in Aerospace Composite Sandwich Panels. *NDT and E International*. 2021;120:102421. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102421>
24. Khodayar F., Lopez F., Ibarra-Castaneda C., Maldague X. Parameter Optimization of Robotize Line Scan Thermography for CFRP Composite Inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2018;37(1):5. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0459-8>

*About the authors:*

**Dmitry Yu. Golovin**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Derzhavin Tambov State University (33 Internatsionalnaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8872-2121>, Scopus ID: 7004150534, [tarlin@yandex.ru](mailto:tarlin@yandex.ru)

**Alexander G. Divin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mechatronics and Technological Measurements, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya St., Tambov 392000, Russian Federation), Senior Researcher at the Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Derzhavin Tambov State University (33 Internatsionalnaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7578-0505>, Researcher ID: G-5718-2017, Scopus ID: 6506701765, [agdv@yandex.ru](mailto:agdv@yandex.ru)

**Alexander A. Samodurov**, Cand.Sci. (Ph.-M.), Senior Researcher at the Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Derzhavin Tambov State University (33 Internatsionalnaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9600-8140>, Researcher ID: P-7056-2014, Scopus ID: 6603455375, [samsasha@yandex.ru](mailto:samsasha@yandex.ru)

**Yuriy A. Zaharov**, Postgraduate Student of the Chair of Mechatronics and Technological Measurements, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya St., Tambov 392000, Russian Federation), Junior Researcher at the Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Derzhavin Tambov State University (33 Internatsionalnaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6840-4418>, [sci.zah@ya.ru](mailto:sci.zah@ya.ru)

**Alexander I. Tyurin**, Cand.Sci. (Ph.-M.), Head of the Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Derzhavin Tambov State University (33 Internatsionalnaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8020-2507>, Scopus ID: 57221837737, [tyurinalexander@yandex.ru](mailto:tyurinalexander@yandex.ru)

**Yuriy I. Golovin**, Dr.Sci. (Ph.-M.), Professor, Head of the Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Derzhavin Tambov State University (33 Internatsionalnaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6804-7057>, Scopus ID: 7006092259, [nano@tsutmb.ru](mailto:nano@tsutmb.ru)

*Authors contribution:*

D. Yu. Golovin – scientific guidance, forming the structure of the article, analyzing literary data, describing the methods and technique for processing, drawing conclusions.

A. G. Divin – analyzing literary data, describing the methods and technique of processing, editing the text, drawing conclusions.

A. A. Samodurov – justification and experimental confirmation of criteria for identifying flaws.

Yu. A. Zaharov – developing the algorithms and software for recording temperature measurements using a thermal imaging camera.

A. I. Tyurin – developing measurement techniques.

Yu. I. Golovin – scientific guidance, formation of the structure of the article, analysis of literature data, writing conclusions on the work.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

Submitted 29.10.2023; revised 02.11.2023; accepted 17.11.2023

*Об авторах:*

**Головин Дмитрий Юрьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8872-2121>, Scopus ID: 7004150534, [tarlin@yandex.ru](mailto:tarlin@yandex.ru)

**Дивин Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники и технологических измерений Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), старший научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7578-0505>, Researcher ID: G-5718-2017, Scopus ID: 6506701765, [agdv@yandex.ru](mailto:agdv@yandex.ru)

**Самодуров Александр Алексеевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9600-8140>, Researcher ID: P-7056-2014, Scopus ID: 6603455375, [samsasha@yandex.ru](mailto:samsasha@yandex.ru)

**Захаров Юрий Андреевич**, аспирант кафедры мехатроники и технологических измерений Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), младший научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6840-4418>, [sci.zah@ya.ru](mailto:sci.zah@ya.ru)

**Тюрин Александр Иванович**, кандидат физико-математических наук, директор НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8020-2507>, Scopus ID: 57221837737, [tyurinalexander@yandex.ru](mailto:tyurinalexander@yandex.ru)

**Головин Юрий Иванович**, доктор физико-математических наук, директор НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6804-7057>, Scopus ID: 7006092259, [nano@tsutmb.ru](mailto:nano@tsutmb.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Д. Ю. Головин – научное руководство, формирование структуры статьи, анализ литературных данных, описание способов и техники обработки, редактирование текста, написание выводов по работе.

А. Г. Дивин – анализ литературных данных, описание способов и техники обработки, редактирование текста, написание выводов по работе.

А. А. Самодуров – проведение измерений и расчетов, подготовка исходного текста и иллюстраций.

Ю. А. Захаров – проведение измерений и расчетов, подготовка исходного текста и иллюстраций.

А. И. Тюрин – проведение измерений и расчетов, подготовка исходного текста и иллюстраций.

Ю. И. Головин – научное руководство, формирование структуры статьи, анализ литературных данных, написание выводов по работе.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Поступила в редакцию 29.10.2023; поступила после рецензирования 02.11.2023;  
принята к публикации 17.11.2023



## Оптические фотолюминесцентные свойства семян растений при заражении микопатогенами

М. В. Беляков<sup>1</sup>✉, М. Н. Московский<sup>1</sup>, И. Ю. Ефременков<sup>1</sup>,  
В. С. Новиков<sup>1</sup>, С. М. Кузнецов<sup>1</sup>, А. А. Бойко<sup>2</sup>,  
С. М. Михайличенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральний научный агроинженерный центр ВИМ  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Донской государственный технический университет  
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К. А. Тимирязева  
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Использование оптического мониторинга качества зерна позволит значительно снизить потери урожая зерновых, вызванные заражением микопатогенами.

**Цель исследования.** Изучение зависимости спектральных характеристик, параметров возбуждения и люминесценции семян зерновых при заражении микопатогенами с целью определения информативных спектральных диапазонов и последующей разработки методики контроля зараженности.

**Материалы и методы.** Для исследования были использованы инокулированные семена пшеницы и ячменя ряда *Fusarium graminearum* и *Alternaria alternata*. Спектры возбуждения и регистрации люминесценции измерялись с помощью дифракционного спектрофлуориметра SM 2203 в диапазоне 230–600 нм. Интегральные и статистические параметры спектров вычислялись в программе Microcal Origin.

**Результаты исследования.** Удалось выяснить, что при заражении микопатогенами уменьшается спектральная поглощательная способность семян. Для пшеницы интегральные параметры поглощения существенно снижаются при заражении альтернарией. В случае с ячменем, наоборот, большее снижение происходит при заражении фузариозом. В области 230–310 нм у зараженных семян появляются новые максимумы возбуждения. При возбуждении излучением с длиной волны  $\lambda = 284$  нм спектральные и интегральные характеристики и параметры зараженных семян превышают аналогичные для незараженных. При возбуждении излучением 424 нм и 485 нм количество здоровых семян пшеницы и ячменя превышает количество зараженных.

**Обсуждение и заключение.** Изменения в спектрах возбуждения и фотолюминесценции могут быть объяснены замещением полисахаридов и белков при поглощении и модификации микокультур. Для объективного контроля заражения семян микопатогенами целесообразно использовать диапазон фотолюминесценции 290–310 нм при возбуждении излучением около 284 нм. Для различения заражения фузариозом и альтернариозом следует использовать контроль фотолюминесценции в диапазоне 380–410 нм.

© Беляков М. В., Московский М. Н., Ефременков И. Ю., Новиков В. С., Кузнецов С. М., Бойко А. А., Михайличенко С. М., 2024



**Ключевые слова:** семена, микопатогены, оптические спектры, фотолюминесценция, альтернариоз, фузариоз, *Fusarium graminearum*, *Alternaria alternata*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

**Для цитирования:** Оптические фотолюминесцентные свойства семян растений при заражении микопатогенами / М. В. Беляков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 281–294. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.281-294>

## Optical Photoluminescent Properties of Plant Seeds when Infected with Mycopathogens

M. V. Belyakov<sup>a</sup>✉, M. N. Moskovskiy<sup>a</sup>, I. Yu. Efremenkov<sup>a</sup>,  
V. S. Novikov<sup>a</sup>, S. M. Kuznetsov<sup>a</sup>, A. A. Boyko<sup>b</sup>,  
S. M. Mikhailichenko<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)

<sup>b</sup> Don State Technical University  
(Rostov-on-Don, Russian Federation)

<sup>c</sup> Russian Timiryazev State Agrarian University  
(Moscow, Russian Federation)

✉ [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Using digital technologies such as optical monitoring of grain quality will reduce losses of grain crops caused by infection with mycopathogens.

**Aim of the Study.** The study is aimed at investigating spectral characteristics, excitation parameters and luminescence of cereal seeds when infected with mycopathogens to determine informative spectral ranges and subsequent development of infection control methods.

**Materials and Methods.** In the study, there were used wheat and barley seeds inoculated with *Fusarium graminearum*, *Alternaria alternata*. Excitation and luminescence registration spectra were measured by a diffraction spectrofluorimeter CM 2203 in the range of 230–600 nm. Integral and statistical parameters of spectra were calculated with the use of Microcal Origin program.

**Results.** It was found that the spectral absorbency of seeds decreases when infected with mycopathogens. For wheat, the integral absorption parameters decrease more significantly when infected with *alternaria*, and for barley, on the contrary, a greater decrease occurs when infected with *fusarium*. In the area of 230–310 nm, new excitation maxima appear in infected seeds. When excited by radiation with a wavelength of  $\lambda = 284$  nm, the spectral and integral characteristics and parameters of infected seeds exceed those for uninfected ones. When excited with 424 nm and 485 nm radiation, the number of disease-free seeds of both wheat and barley exceeds the number of infected seeds.

**Discussion and Conclusion.** The changes in excitation and photoluminescence spectra can be explained by the substitution of polysaccharides and proteins during mycoculture uptake and modification. To objectively monitor the mycopathogen infestation of seeds, it is advisable to use a photoluminescence range of 290–310 nm when excited by radiation of about 284 nm. To determine if the infection caused with *fusarium* or *alternariasis*, photoluminescence monitoring should be used in the range of 380–410 nm.

**Keywords:** seeds, mycopathogens, optical spectra, photoluminescence, alternariasis, fusariasis, *Fusarium graminearum*, *Alternaria alternata*

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

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the reviewers, whose critical evaluation of the presented materials and suggestions for improvement contributed significantly to the quality of this article.

**For citation:** Belyakov M.V., Moskovskiy M.N., Efremkov I.Yu., Novikov V.S., Kuznetsov S.M., Boyko A.A., et al. Optical Photoluminescent Properties of Plant Seeds when Infected with Mycopathogens. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):281–294. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.281-294>

**Введение.** Повышения производительности труда в сельском хозяйстве, снижения энергетических и материальных затрат, обеспечения экологической безопасности возможно добиться путем создания и внедрения средств автоматизации, роботизации и цифровых технологий [1]. Одним из основных факторов, влияющих на потери урожая зерновых культур, являются болезни растений. Ежегодно во всем мире теряется 15–50 % зерновых из-за заражения микопатогенами. Кроме того, 25 % сельскохозяйственных культур, используемых в пищу людьми и животными, заражены микотоксинами [2]. Поэтому необходимы более эффективные и устойчивые технологии для лучшего контроля состояния сельскохозяйственных культур.

Фузариозная гниль, вызываемая грибковым патогеном рода *Fusarium*, – хроническое заболевание зерновых во многих регионах земледелия. Среди зерновых культур мягкая и твердая пшеница восприимчивы к виду *Fusarium pseudograminearum*. Ячмень считается более толерантной культурой и демонстрирует ограниченные потери урожая при заражении. *Fusarium pseudograminearum* также может инфицировать овес, что приводит лишь к незначительному развитию симптомов заболевания или их отсутствию.

Получение чистых спектров симптомов болезней растений имеет важное значение для повышения надежности методов их защиты. Характеристики и параметры фотолуминесценции, полученные из чистых спектров, можно использовать в качестве ценных обучающих данных для разработки алгоритмов, предназначенных для обнаружения болезней растений оптическими методами.

Цель исследования заключается в изучении зависимости спектральных характеристик, параметров возбуждения и люминесценции семян пшеницы и ячменя при заражении микопатогенами *Fusarium graminearum* и *Alternaria alternata* для определения информативных спектральных диапазонов и последующей разработки методики контроля зараженности.

**Обзор литературы.** В настоящее время для диагностики популяции грибов рода *Fusarium* разработан количественный анализ методом ПЦР с использованием зондов [3]. Также имеются данные о применении метода анализа междуузлий, выполняемого с использованием интактных цветущих растений пшеницы, для точной идентификации процесса инфицирования тканей пшеницы микопатогеном *Fusarium graminearum* [4]. В том числе исследована жидкостная хроматография



(гибридная масс-спектрометрия) для широкого анализа метаболических профилей и идентификации метаболитов сопротивления связанного *Fusarium* колоса ячменя [5]. Гистопатологическую оценку инфекции возбудителем гнили *Fusarium pseudograminearum* в тканях проростков пшеницы можно проводить и с помощью флуоресцентной микроскопии [6].

Выявлено спектральное различие симптомов листовой ржавчины, вызываемых двумя особыми формами грибов. *Puccinia recondite f. sp. tritici* – на пшенице и *Puccinia recondita f. sp. recondite* – на листовой чешуе ржи. Спектральные измерения проводились на спектрометре FieldSpec 3 в диапазоне длин волн 350–2500 нм [7].

Исследования зарубежных авторов показали, что пестрота, пигментный состав или светоотражающие свойства изменяют фотофизическое поведение листьев [8]. Для расчета коэффициентов поглощения и рассеяния ими были получены спектры отражения и пропускания в УФ-видимой и ближней ИК-области.

Широкий интерес для современной науки представляет гиперспектральная визуализация. Она возникла из дистанционного зондирования и объединяет области машинного зрения и точечной спектроскопии, обеспечивая превосходную сегментацию изображения для обнаружения дефектов [9–11]. Благодаря достижениям в области оборудования и анализа данных за последние два десятилетия технология гиперспектральной визуализации превратилась в мощный инструмент неразрушающего контроля [12–15].

К настоящему времени недостаточно изучен потенциал фотолюминесцентных методов диагностики заболеваний растений фузариозом в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Так, для спектроскопического исследования E-Z фотоизомеризации нового цитретрилацилгидразона спектры поглощения в ультрафиолетовом диапазоне регистрировались на диодном спектрофотометре Agilent Cary 8454 в диапазоне 250–600 нм. Спектры излучения были измерены на спектрофотометре Horiba Jobin Yvon FluoroMax-4 [16]. Использовались методы оптического поглощения и флуоресценции, чтобы сделать выводы о том, как артепиллин С бразильского зеленого прополиса взаимодействует с амфифильными агрегатами. Спектры оптического поглощения представляли состояние протонирования, продиктованное локальным рН на поверхности мицелл и липидных пузырьков [17].

Также исследователи, применяя рН-зависимую УФ-видимую спектроскопию и моделирование спектрального разложения, изучают взаимодействие между соседними аминокислотами и билином в семействе фитохромов [18]. Флуорометрический метод позволяет оценивать концентрацию хлорофилла *a*, вносимого отдельными группами водорослей в реальном образце, путем подгонки его спектра возбуждения флуоресценции к линейной комбинации нормальных спектров соответствующих групп водорослей [19]. В том числе получены полезные данные для оптимизации послеуборочных фотохимических протоколов с помощью неразрушающего оптического датчика [20].

Для оценки растительных кормов применяются переносные оптические приборы [21–23].

Таким образом, фотолюминесцентный метод, наряду с оптическим, активно применяется для исследования биологических объектов и может быть использован для диагностики заражения семян микопатогенами.

**Материалы и методы.** Для измерений авторами были взяты образцы пшеницы «тимирязевская 150» и ячменя «богатырь». Процесс заражения семян микопатогенами происходил следующим образом. Зерна пшеницы и ячменя были взвешены и расфасованы в пакеты по 7,0–7,5 г, а затем обеззаражены. Далее их поместили в стерильные стеклянные чашки Петри, к которым отдельными чистыми пипетками Пастера добавили по 3 мл раствора со спорами *Fusarium graminearum* и *Alternaria alternata*. Таким образом, зерна каждой культуры были заражены отдельно двумя разными патогенами. После проделанных действий чашки Петри были запечатаны парафилмом, упакованы в герметичные пакеты и помещены на хранение в термостат при температуре 28 °С.

Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводились на спектрофлуориметре СМ 2203 фирмы «Солар». Сначала измерялись характеристики возбуждения  $\eta_e(\lambda)$  в диапазоне от 230–600 нм по ранее разработанной методике [24]. На основе полученных результатов были измерены спектры фотолюминесценции  $\varphi_l(\lambda)$ . По полученным спектральным характеристикам вычислена интегральная поглощательная способность  $H$  (в относительных единицах – о. е.) по формуле:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $\eta_e(\lambda)$  – спектральная характеристика возбуждения, о. е./нм;  $\lambda_1, \lambda_2$  – границы спектрального диапазона возбуждения, нм.

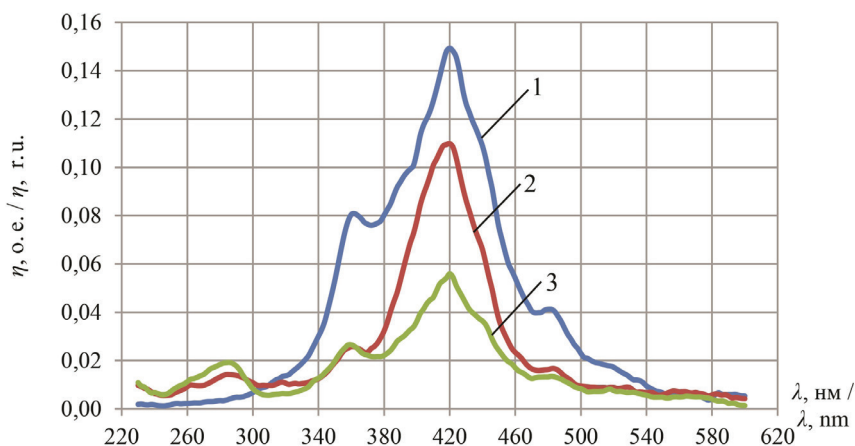
Интегральные параметры спектров  $\varphi_l(\lambda)$  – потоки фотолюминесценции  $\Phi$  (в относительных единицах) определяли по формуле:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_l(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $\varphi_l(\lambda)$  – спектральная характеристика фотолюминесценции, о. е./нм;  $\lambda_1, \lambda_2$  – границы спектрального диапазона фотолюминесценции, нм.

Все измерения проводились в двадцатикратной повторности так, чтобы погрешность определения интегральных параметров  $H$  и  $\Phi$  не превышала 10 % при доверительной вероятности 0,9. Кроме того, в программе Microcal Origin были рассчитаны статистические параметры спектров: математическое ожидание  $M_x$ , дисперсия  $\sigma^2$ , асимметрия  $A_S$  и эксцесс  $E_X$ .

**Результаты исследования.** Спектральные характеристики возбуждения пшеницы, полученные при синхронном сканировании, представлены на рисунке 1, а интегральные параметры спектров, рассчитанные по формуле (1), – в таблице 1.



Р и с. 1. Спектральные характеристики возбуждения пшеницы:  
 1 – здоровой; 2 – зараженной *Fusarium graminearum*; 3 – зараженной *Alternaria alternata*

F i g. 1. Spectral characteristics of wheat excitation:  
 1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

Источники: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Интегральные параметры спектров возбуждения пшеницы**  
**Integral Parameters of Wheat Excitation Spectra**

Вид семян / Type of seed	Н, о. е. (для спектрального диапазона, нм) / Н, r. u. (for the spectral range, nm)			
	230–310	310–380	380–470	470–540
Здоровые / Disease-free	0,29	3,17	9,06	1,72
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	0,79	1,22	5,82	0,77
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	0,92	1,09	3,06	0,64

Источники: здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.

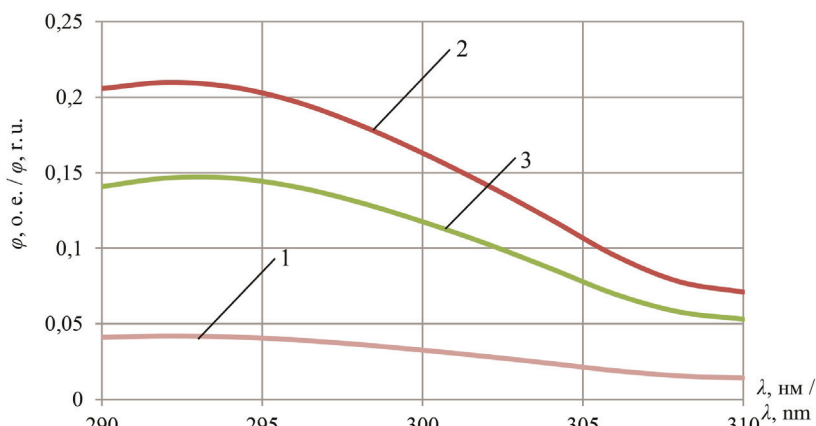
Source: Hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

На рисунках 2 и 3 отображены спектры фотолюминесценции пшеницы при возбуждении излучением 284 нм и 424 нм соответственно.

Интегральные параметры спектров фотолюминесценции пшеницы, рассчитанные по формуле (2), представлены в таблице 2.

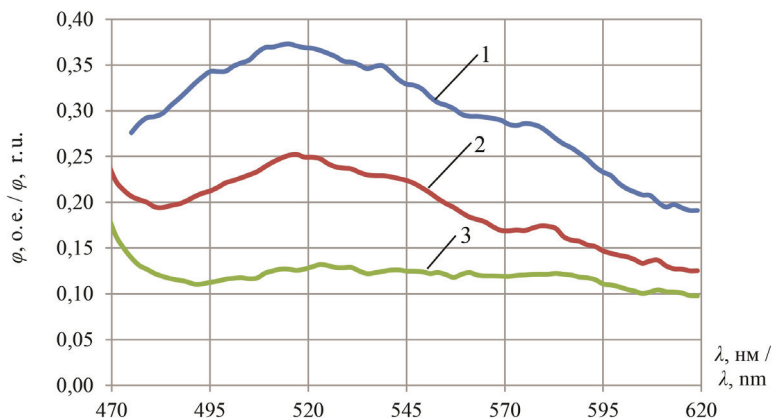
Спектральные характеристики возбуждения ячменя, полученные при синхронном сканировании, показаны на рисунке 4, а интегральные параметры спектров – в таблице 3.

На рисунках 5 и 6 представлены спектры фотолюминесценции ячменя при возбуждении излучением 284 нм и 424 нм соответственно.



Р и с. 2. Спектральные характеристики люминесценции пшеницы при  $\lambda_b = 284$  нм:  
1 – здоровой; 2 – зараженной *Fusarium graminearum*; 3 – зараженной *Alternaria alternata*

F i g. 2. Spectral characteristics of wheat luminescence at  $\lambda_b = 284$  nm:  
1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*



Р и с. 3. Спектральные характеристики люминесценции пшеницы при  $\lambda_b = 424$  нм:  
1 – здоровой; 2 – зараженной *Fusarium graminearum*; 3 – зараженной *Alternaria alternata*

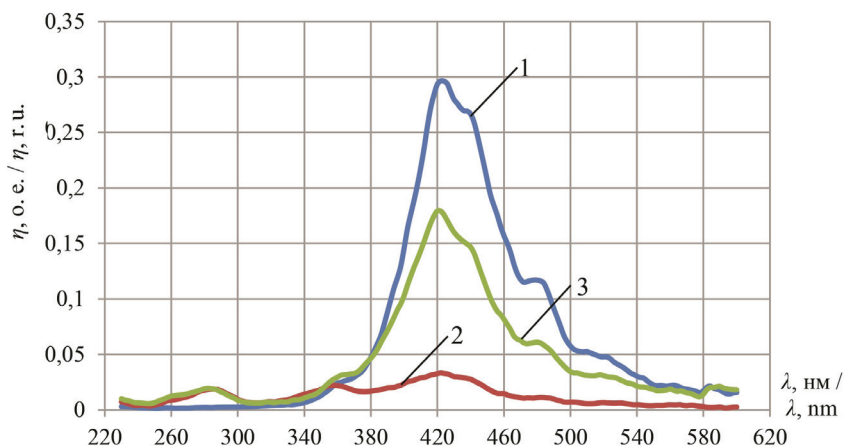
F i g. 3. Spectral characteristics of wheat luminescence at  $\lambda_b = 424$  nm:  
1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

Т а б л и ц а 2

Т a b l e 2

**Интегральные параметры спектров люминесценции пшеницы**  
**Integral Parameters of Wheat Luminescence Spectra**

Вид семян / Type of seed	$\Phi_{284}$ , о. е. / $\Phi_{284}$ , г. у.	$\Phi_{362}$ , о. е. / $\Phi_{362}$ , г. у.	$\Phi_{424}$ , о. е. / $\Phi_{424}$ , г. у.	$\Phi_{485}$ , о. е. / $\Phi_{485}$ , г. у.
Disease-free / Healthy	0,61	33	43	18
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	3,06	72	30	10
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	2,19	66	19	9

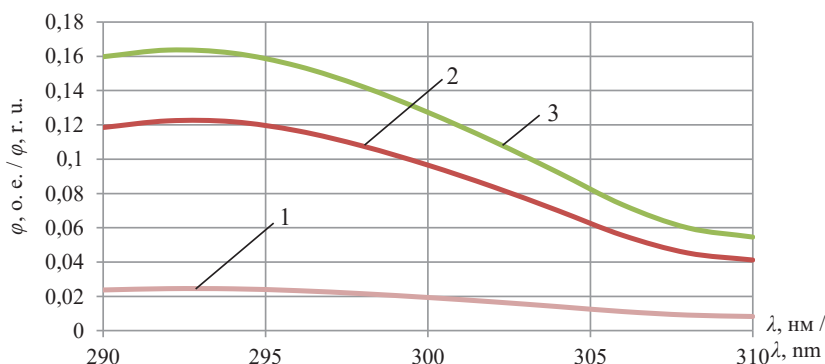


Р и с. 4. Спектральные характеристики возбуждения ячменя:  
 1 – здорового; 2 – зараженного *Fusarium graminearum*; 3 – зараженного *Alternaria alternata*  
 F i g. 4. Spectral characteristics of barley excitation:  
 1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

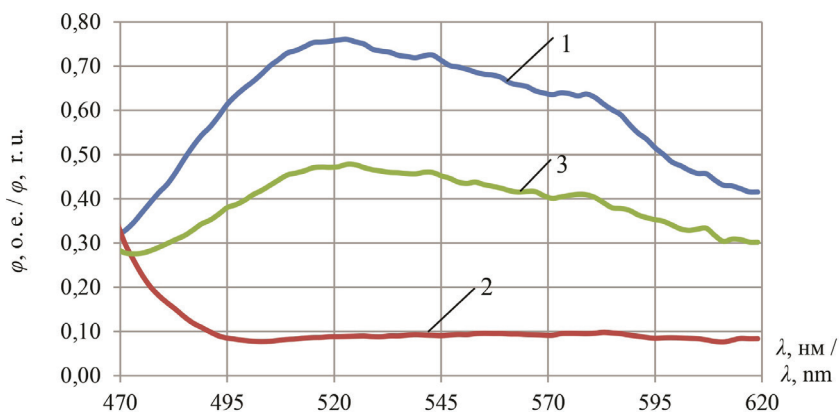
Т а б л и ц а 3  
 T a b l e 3

**Интегральные параметры спектров возбуждения ячменя**  
**Integral Parameters of the Excitation Spectra of Barley**

Вид семян / Type of seed	Н, о. е. (для спектрального диапазона, нм) / Н, r. u. (for the spectral range, nm)			
	230–310	310–380	380–470	470–540
Disease-free / Healthy	0,17	1,04	17,44	4,80
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	0,80	1,00	2,10	0,53
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	0,92	1,31	10,49	2,76



Р и с. 5. Спектральные характеристики люминесценции ячменя при  $\lambda_b = 284$  нм:  
 1 – здорового; 2 – зараженного *Fusarium graminearum*; 3 – зараженного *Alternaria alternata*  
 F i g. 5. Spectral characteristics of the luminescence of barley at  $\lambda_b = 284$  нм:  
 1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*



Р и с. 6. Спектральные характеристики люминесценции ячменя при  $\lambda_b = 424$  нм:  
1 – здорового; 2 – зараженного *Fusarium graminearum*; 3 – зараженного *Alternaria alternata*

F i g. 5. Spectral characteristics of the luminescence of barley at  $\lambda_b = 424$  nm:  
1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

Интегральные параметры спектров фотолюминесценции ячменя показаны далее в таблице 4.

Т а б л и ц а 4  
T a b l e 4

**Интегральные параметры спектров люминесценции ячменя**  
**Integral Parameters of Barley Luminescence Spectra**

Вид семян / Type of seed	$\Phi_{284}$ , о. е. / $\Phi_{284}$ , г. у.	$\Phi_{362}$ , о. е. / $\Phi_{362}$ , г. у.	$\Phi_{424}$ , о. е. / $\Phi_{424}$ , г. у.	$\Phi_{485}$ , о. е. / $\Phi_{485}$ , г. у.
Здоровые / Disease-free	0,36	34	89	59
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	1,80	143	14	8
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	2,39	54	57	34

В таблице 5 представлены статистические параметры спектров возбуждения пшеницы и ячменя.

Т а б л и ц а 5  
T a b l e 5

**Статистические параметры спектров возбуждения пшеницы и ячменя**  
**Statistical Parameters of the Excitation Spectra of Wheat and Barley**

Вид семян / Type of seed	$M_2$ , нм / $M_2$ , nm	$\sigma^2$	$A_s$	$E_x$
1	2	3	4	5
Пшеница здоровая / Disease-free wheat	417	2 897	0,34	$6,99 \cdot 10^5$
Пшеница зараженная <i>Fusarium graminearum</i> / Wheat infected with <i>Fusarium graminearum</i>	411	4 245	-0,13	$2,89 \cdot 10^5$
Пшеница зараженная <i>Alternaria alternata</i> / Wheat infected with <i>Alternaria alternata</i>	401	5 724	-0,11	$2,52 \cdot 10^5$



Окончание табл. 5 / End of table 5

1	2	3	4	5
Ячмень здоровый / Disease-free barley	445	2 379	0,41	$1,30 \cdot 10^6$
Ячмень зараженный <i>Fusarium graminearum</i> / Barley infected with <i>Fusarium graminearum</i>	433	4 263	-0,18	$3,36 \cdot 10^5$
Ячмень зараженный <i>Alternaria alternata</i> / Barley infected with <i>Alternaria alternata</i>	397	6 174	0,07	$2,29 \cdot 10^5$

**Обсуждение и заключение.** Из рисунков 1 и 4 видна общая тенденция уменьшения спектральной поглощательной способности  $\eta$  при заражении микопатогенами. Однако для пшеницы заражение альтернарией существенно больше снижает поглощающие характеристики и параметры, примерно в 3 раза для  $N_{380-470}$  (табл. 1), а для ячменя, наоборот, большее снижение происходит при заражении фузариозом (в 3,8 раза для  $N_{380-470}$ ). В длинноволновой области все спектры сохраняют подобие, а в области 230–310 нм у зараженных семян появляются новые максимумы возбуждения. У пшеницы интегральный параметр  $N_{230-310}$  в 2,7–3,2 раза для зараженных семян превышает аналогичный для незараженных, а для ячменя такое превышение составляет 4,7–5,4 раза.

Появление подобных пиков было отмечено исследователями ранее [24], но в более коротковолновой области (около 232 нм), что может быть связано со временем заражения растений с привязкой к фазе созревания семян. Это подтверждает исследование, где отмечалось относительное увеличение доли коротковолнового возбуждения у незрелых семян [25].

Подобная тенденция сохраняется и для спектров фотолюминесценции. При возбуждении излучением с длиной волны  $\lambda = 284$  нм спектральные и интегральные характеристики и параметры зараженных семян превышают аналогичные для незараженных. Для пшеницы наибольший поток фотолюминесценции отмечается у семян, пораженных фузариозом, а для семян ячменя – альтернариозом (табл. 2, 4). При возбуждении длинноволновым излучением ( $\lambda = 424$  нм и  $\lambda = 485$  нм) потоки здоровых семян как пшеницы, так и ячменя превышают потоки зараженных (табл. 2, 4).

Из-за наличия максимумов в коротковолновой области (рис. 1, 4) математическое ожидание для зараженных семян уменьшается, особенно для ячменя инокулированного грибом *Alternaria alternata*. Качественно меняется величина асимметрии: меняется знак и уменьшается абсолютное значение. У зараженных семян эксцесс снижается в 2,4–2,8 раза для пшеницы и в 3,9–5,7 раза для ячменя.

Предположение о законе распределения можно проверить с помощью коэффициентов асимметрии и эксцесса. Выдвинув гипотезу о нормальном распределении зависимостей  $\eta_e(\lambda)$  для уровня значимости 0,05 из таблицы 5, мы видим, что нормальными можно считать только спектральные характеристики возбуждения для зараженных семян (по величине асимметрии). По критерию эксцесса все полученные зависимости не подчиняются нормальному закону распределения.

Изменения в спектрах возбуждения и фотолюминесценции могут быть объяснены изменениями структуры и химического состава поверхности зерна, а именно

замещением полисахаридов и белков при поглощении и модификации микокультур *Fusarium* и *Alternaria*. Также из-за влияния на спектры пигментов этого возбудителя (фузариона) и микотоксинов (DON, ZEL, T-2 и NT-2) спектры будут приближаться к спектрам этих веществ.

Таким образом, для объективного контроля заражения семян микотоксинами целесообразно использовать диапазон коротковолновой фотолюминесценции 290–310 нм при возбуждении излучением около 284 нм. Для различения заражения фузариозом и альтернариозом возможно использовать контроль фотолюминесценции в диапазоне 380–410 нм при возбуждении излучением  $\lambda = 362$  нм для пшеницы. Для ячменя целесообразно использовать отношение потоков фотолюминесценции при возбуждении 362 и 424 нм. Возбуждение излучением 485 нм использовать малоэффективно из-за сравнительно слабого фотолюминесцентного сигнала.

## REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital Technologies and Robotic Devices in the Agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
2. Zudyte B., Luksiene Z. Visible Light-Activated ZnO Nanoparticles for Microbial Control of Wheat Crop. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;219:112206. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112206>
3. Hogg A.C., Johnston R.H., Dyer A.T. Applying Real-Time Quantitative PCR to Fusarium Crown Rot of Wheat. *Plant Disease*. 2007;91(8):1021–1028. <https://doi.org/10.1094/PDIS-91-8-1021>
4. Brown N.A., Evans J., Mead A., Hammond-Kosack K.E. A Spatial Temporal Analysis of the Fusarium Graminearum Transcriptome during Symptomless and Symptomatic Wheat Infection. *Molecular Plant Pathology*. 2017;18(9):1295–1312. <https://doi.org/10.1111/mp.12564>
5. Bollina V., Kumaraswamy G.K., Kushalappa A.C., Choo T.M., Dion Y., Rioux S., et al. Mass Spectrometry-Based Metabolomics Application to Identify Quantitative Resistance-Related Metabolites in Barley Against Fusarium Head Blight. *Molecular Plant Pathology*. 2010;11(6):769–782. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00643.x>
6. Knight N.L., Sutherland M.W. Histopathological Assessment of Wheat Seedling Tissues Infected by Fusarium Pseudograminearum. *Plant Pathology*. 2013;62(3):679–687. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2012.02663.x>
7. Wójtowicz A., Piekarczyk J., Czernecki B., Ratajkiewicz H. A Random Forest Model for the Classification of Wheat and Rye Leaf Rust Symptoms Based on Pure Spectra at Leaf Scale. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;223:112278. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112278>
8. Cuba N.I., Torres R., San Román E., Lagorio M.G. Influence of Surface Structure, Pigmentation and Particulate Matter on Plant Reflectance and Fluorescence. *Photochemistry and Photobiology*. 2021;97(1):110–121. <https://doi.org/10.1111/php.13273>
9. Huang W.J., Lu J.J., Ye H.C., Kong W.P., Mortimer A.H., Shi Y. Quantitative Identification of Crop Disease and Nitrogen-Water Stress in Winter Wheat Using Continuous Wavelet Analysis. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(2):145–152. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181102.3467>
10. Williams P.J., Geladi P., Britz T.J., Manley M. Investigation of Fungal Development in Maize Kernels Using Nir Hyperspectral Imaging and Multivariate Data Analysis. *Journal of Cereal Science*. 2012;55(3):272–278. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.12.003>

11. Yao H., Hruska Z., Kincaid R., Brown R.L., Bhatnagar D., Cleveland T.E. Detecting Maize Inoculated With Toxicigenic and Atoxigenic Fungal Strains with Fluorescence Hyperspectral Imagery. *Biosystems Engineering*. 2013;115(2):125–135. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.006>
12. Lu Y., Saeys W., Kim M., Peng Y., Lu R. Hyperspectral Imaging Technology for Quality and Safety Evaluation of Horticultural Products: a Review and Celebration of the Past 20-Year Progress. *Post-harvest Biology and Technology*. 2020;170:111318. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111318>
13. Shurygin B., Chivkunova O., Solovchenko O., Solovchenko A., Dorokhov A., Smirnov I., et al. Comparison of the Non-Invasive Monitoring of Fresh-Cut Lettuce Condition with Imaging Reflectance Hyperspectrometer and Imaging PAM-Fluorimeter. *Photonics*. 2021;8(10):425. <https://doi.org/10.3390/photonics8100425>
14. Sun Z., Hu D., Wang Z., Xie L., Ying Y. Spatial-Frequency Domain Imaging: An Emerging Depth-Varying and Wide-Field Technique for Optical Property Measurement of Biological Tissues. *Photonics*. 2021;8(8):162. <https://doi.org/10.3390/photonics8050162>
15. Platonova G., Štys D., Souček P., Lonhus K., Valenta J., Rychtáriková R. Spectroscopic Approach to Correction and Visualisation of Bright-Field Light Transmission Microscopy Biological Data. *Photonics*. 2021;8(5):333. <https://doi.org/10.3390/photonics8080333>
16. Toro P.M., Jara D.H., Klahn A.H., Villaman D., Fuentealba M., Vega A., et al. Spectroscopic Study of the E/Z Photoisomerization of a New Cyrhetyrenyl Acylhydrazone: A Potential Photoswitch and Photosensitizer. *Photochemistry and Photobiology*. 2021;97(1):61–70. <https://doi.org/10.1111/php.13309>
17. Camuri I.J., da Costa A.B., Ito A.S., Pazin W.M. pH and Charge Effects Behind the Interaction of Artepillin C, the Major Component of Green Propolis, with Amphiphilic Aggregates: Optical Absorption and Fluorescence Spectroscopy Studies. *Photochemistry and Photobiology*. 2019;95(6):1345–1351. <https://doi.org/10.1111/php.13128>
18. Rumfeldt J.A., Takala H., Liukkonen A., Ihalainen J.A. UV-Vis Spectroscopy Reveals a Correlation Between Y263 and BV Protonation States in Bacteriophytochromes. *Photochemistry and Photobiology*. 2019;95:969–979. <https://doi.org/10.1111/php.13095>
19. Gsponer N.S., Rodríguez M.C., Palacios R.E., Chesta C.A. On the Simultaneous Identification and Quantification of Microalgae Populations Based on Fluorometric Techniques. *Photochemistry and Photobiology*. 2018;94:875–880. <https://doi.org/10.1111/php.12936>
20. Kowalski A., Agati G., Grzegorzewska M., Kosson R., Kusznierevicz B., Chmiel T., et al. Valorization of Waste Cabbage Leaves by Postharvest Photochemical Treatments Monitored with a Non-destructive Fluorescence-based Sensor. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;222:112263. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112263>
21. Cherney J.H., Digman M.F., Cherney D.J. Handheld NIRS for Forage Evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;190:106469. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106469>
22. Acosta J., Castillo M.S., Hodge G.R. Comparison of Benchtop and Handheld Near-Infrared Spectroscopy Devices to Determine Forage Nutritive Value. *Crop Science*. 2020;60(6):3410–3422. <https://doi.org/10.1002/csc2.20264>
23. Berzaghi P., Cherney J.H., Casler M.D. Prediction Performance of Portable Near Infrared Reflectance Instruments Using Preprocessed Dried, Ground Forage Samples. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;182:106013. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106013>
24. Dorokhov A., Moskovskiy M., Belyakov M., Lavrov A., Khamuev V. Detection of Fusarium Infected Seeds of Cereal Plants by the Fluorescence Method. *PLOS ONE*. 2022;17(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267912>
25. Belyakov M., Sokolova E., Listratenkova V., Ruzanova N., Kashko L. Photoluminescent Control Ripeness of the Seeds of Plants. *E3S Web of Conferences*. 2021;273:01003. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202127301003>

Об авторах:

**Беляков Михаил Владимирович**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве

ве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

**Московский Максим Николаевич**, доктор технических наук, профессор Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна и семян Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5727-8706>, Researcher ID: L-5153-2017, [maxmoskovsky74@yandex.ru](mailto:maxmoskovsky74@yandex.ru)

**Ефременков Игорь Юрьевич**, специалист лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, [matiusharius@mail.ru](mailto:matiusharius@mail.ru)

**Новиков Василий Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна и семян Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3304-1568>, Researcher ID: H-8443-2018, [vasiliy1992@gmail.com](mailto:vasiliy1992@gmail.com)

**Кузнецов Сергей Михайлович**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна и семян Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8378-7085>, Researcher ID: H-9433-2018, [kuznetsov.sm.93@gmail.com](mailto:kuznetsov.sm.93@gmail.com)

**Бойко Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0890-9617>, Researcher ID: ABD-3703-2020, [andreyboi@yandex.ru](mailto:andreyboi@yandex.ru)

**Михайличенко Станислав Михайлович**, доцент кафедры сельскохозяйственных машин Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2305-2909>, Researcher ID: IQW-4878-2023, [S.M.Mikhailichenko@yandex.ru](mailto:S.M.Mikhailichenko@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

М. В. Беляков – анализ литературных данных, описание метода и способа предварительной обработки, составление выводов и заключения, доработка текста статьи.

М. Н. Московский – научное руководство, формирование структуры статьи, доработка начального текста, критический анализ.

И. Ю. Ефременков – проведение измерений и расчетов, подготовка начального варианта текста, оформление графического материала.

В. С. Новиков – проведение измерений и расчетов, доработка начального текста.

С. М. Кузнецов – проведение измерений и расчетов, доработка начального текста.

А. А. Бойко – описание методов и способа предварительной обработки.

С. М. Михайличенко – анализ литературных данных, составление выводов и заключения.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 16.10.2023; поступила после рецензирования 10.01.2024;  
принята к публикации 25.01.2024*

*About the authors:*

**Mikhail V. Belyakov**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agro-

gineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

**Maksim N. Moskovskiy**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Post-Harvest Processing of Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5727-8706>, Researcher ID: L-5153-2017, [maxmoskovsky74@yandex.ru](mailto:maxmoskovsky74@yandex.ru)

**Igor Yu. Efremkov**, Specialist of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, [matiusharius@mail.ru](mailto:matiusharius@mail.ru)

**Vasilij S. Novikov**, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Researcher at the Laboratory of Technologies and Machines for Post-harvest Processing of Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3304-1568>, Researcher ID: H-8443-2018, [vasilij1992@gmail.com](mailto:vasilij1992@gmail.com)

**Sergey M. Kuznetsov**, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Researcher at the Laboratory of Technologies and Machines for Post-Harvest Processing of Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8378-7085>, Researcher ID: H-9433-2018, [kuznetsov.sm.93@gmail.com](mailto:kuznetsov.sm.93@gmail.com)

**Andrey A. Boyko**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0890-9617>, Researcher ID: ABD-3703-2020, [andreyboi@yandex.ru](mailto:andreyboi@yandex.ru)

**Stanislav M. Mikhailichenko**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Agricultural Machines, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2305-2909>, Researcher ID: IQW-4878-2023, [S.M.Mikhailichenko@yandex.ru](mailto:S.M.Mikhailichenko@yandex.ru)

*Authors contribution:*

M. V. Belyakov – analyzing literary data, describing the methods and technique of preliminary processing, editing the text, drawing conclusions, drawing the conclusions.

M. N. Moskovskiy – scientific guidance, forming the structure of the article, revising the initial text, critical analysis.

I. Yu. Efremkov – making measurements and calculations, preparing the initial version of the text and illustrations.

V. S. Novikov – making measurements and calculations, finalizing the initial text.

S. M. Kuznetsov – making measurements and calculations, finalizing the initial text.

A. A. Boyko – describing the methods and technique of preliminary processing.

S. M. Mikhailichenko – analyzing the literary data, drawing the conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 16.10.2023; revised 10.01.2024; accepted 25.01.2024*

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Оригинальная статья / Original article

УДК 628.93:004.94

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402.295-317



## Компьютерное моделирование цифровой системы автоматического регулирования освещенности

Е. А. Шабает<sup>1</sup> ✉, М. М. Романовец<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кубанский государственный технологический университет  
(г. Краснодар, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Азово-Черноморский инженерный институт

Донского ГАУ (г. Зерноград, Российская Федерация)

✉ [sea007@rambler.ru](mailto:sea007@rambler.ru)

### Аннотация

**Введение.** В птицеводстве перспективным направлением является применение систем локального светодиодного освещения с изменяемой освещенностью и коррелированной цветовой температурой оптического излучения светильников в течение светового периода. Для точного поддержания интенсивности света на заданном уровне требуется система автоматического регулирования освещенности.

**Цель исследования.** Определение параметров пропорционально-интегрального регулятора цифровой системы автоматического регулирования освещенности в клетках для содержания сельскохозяйственной птицы, обеспечивающих требуемые показатели качества.

**Материалы и методы.** В работе использованы элементы математической статистики, теории планирования экспериментальных исследований, корреляционно-регрессионного анализа, теории автоматического управления и компьютерного моделирования. Натурные эксперименты проводились на лабораторном образце цифровой системы динамического локального освещения. Компьютерное моделирование было выполнено в среде SimInTech.

**Результаты исследования.** Разработана компьютерная модель цифровой системы автоматического регулирования освещенности. Выполнен расчет настроек ПИ-регулятора по методам ШР, ВТИ, Копеловича. Произведена сравнительная оценка качества процесса регулирования по графикам переходных процессов, полученных путем компьютерного моделирования. Достоверность результатов компьютерного моделирования системы автоматического регулирования освещенности подтверждена экспериментально.

**Обсуждение и заключение.** Высокие показатели качества регулирования цифровой системы автоматического регулирования освещенности обеспечил ПИ-регулятор с  $k_p = 14,027 \cdot 10^{-3}$  и  $T_i = 145,72$  мс, рассчитанными по методу Копеловича. Сравнительная оценка переходных процессов в реальной системе и в компьютерной модели

© Шабает Е. А., Романовец М. М., 2024



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



данной системы позволяет сделать вывод о высокой точности разработанного образа и корректности выбора параметров моделирования в среде SimInTech. Экспериментально установлено, что требуемое качество процесса регулирования системы обеспечивается для широкого диапазона заданной освещенности от 1 до 25 лк.

**Ключевые слова:** система локального освещения, светодиодный светильник, управление освещенностью, САР, ПИ-регулятор, моделирование, компьютерная модель, SimInTech

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

**Для цитирования:** Шабаетв Е. А., Романовец М. М. Компьютерное моделирование цифровой системы автоматического регулирования освещенности // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 295–317. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.295-317>

## Computer Simulation of a Digital System of Automatic Light Control

E. A. Shabaev<sup>a</sup>✉, M. M. Romanovets<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Kuban State Technological University  
(Krasnodar, Russian Federation)

<sup>b</sup> Azov-Black Sea Engineering Institute  
of Don State Agrarian University  
(Zernograd, Russian Federation)

✉ [sea007@rambler.ru](mailto:sea007@rambler.ru)

### Abstract

**Introduction.** In the poultry industry, the use of local LED lighting systems with changeable light and correlated color temperature of the luminaire optical radiation during the photoperiod is promising. To maintain light intensity accurately at a specified level, the use of an automatic control system (ACS) of lighting is required.

**Aim of the Study.** The study aimed at determining the parameters for the PI controller of the digital ACS of lighting in all-age cages, providing the required quality indicators of the regulatory process.

**Materials and Methods.** For the study there were used the elements of mathematical statistics, experimental research design theory, correlation and regression analysis, automatic control theory and computer simulation. Real experiments were carried out on a laboratory sample of a digital dynamic local lighting system. Computer simulation was performed in the SimInTech program.

**Results.** A computer model for a digital ACS of lighting has been developed. The tunings of the PI controller were calculated using the CHR, VTI, and Kopelovich methods. A comparative estimation of the control process quality was carried out using graphs of transient processes obtained by computer simulation. The reliability of the results of computer simulation of ACS lighting has been confirmed experimentally.

**Discussion and Conclusion.** High regulator performance indicators for the digital ACS of lighting were ensured by a PI controller with  $k_p = 14.027 \cdot 10^{-3}$  and  $T_i = 145.72$  ms calculated using the Kopelovitch method. A comparative assessment of transient processes in a real ACS and in a computer model of this system allows concluding that the developed model is highly accurate and the choice of simulation parameters in the SimInTech program is correct. It has been experimentally established that the required quality of the control process of ACS is ensured for a wide range of specified lighting: from 1 to 25 lux.

**Keywords:** local lighting system, LED lamp, lighting control, digital automatic control system, PI controller, simulation, computer model, SimInTech

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

**Acknowledgements:** The authors would like to thank anonymous reviewers.

**For citation:** Shabaev E.A., Romanovets M.M. Computer Simulation of a Digital System of Automatic Light Control. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):295–317. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.295-317>

**Введение.** Организм сельскохозяйственной птицы очень чувствителен к воздействию света [1]. Многие процессы ее жизнедеятельности напрямую или косвенно регулируются светотемновым циклом [2–4]. В условиях интенсификации производства искусственная среда содержания животных и птиц не всегда соответствует физиологическим потребностям их организма [5–7]. За счет создания благоприятной световой среды можно повысить продуктивность сельскохозяйственной птицы. Для этой цели наиболее перспективно применение локального освещения с большим количеством светильников малой мощности [8–10].

Реализовать искусственную световую среду с рациональными параметрами позволяет цифровая система динамического локального освещения клеток с изменяемой освещенностью и коррелированной цветовой температурой (далее – КЦТ) [10]. Такая система позволяет в автоматическом режиме управлять световыми потоками светодиодов теплого и холодного свечений, изменяя уровень освещенности и КЦТ оптического излучения светильников в соответствии с динамикой естественного солнечного света [11; 12], что положительно сказывается на продуктивности и физиологическом состоянии сельскохозяйственной птицы [13–17].

Точное поддержание заданного уровня освещенности обеспечивается системой автоматического регулирования (далее – САР) освещенности. Применение САР позволяет компенсировать запыленность светильников, деградацию светодиодов в процессе эксплуатации и изменения фоновой освещенности в помещении.

В результате анализа и синтеза САР освещенности необходимо определить тип закона управления и оптимальные настройки регулятора. При этом следует учитывать широкий диапазон изменения заданного уровня освещенности и следующие показатели качества регулирования в установившемся режиме: статическая ошибка  $\Delta E_{ст} \leq 2,5\%$ ; время регулирования  $t_p \leq 1$  с; перерегулирование  $\sigma \leq 10\%$ ; количество перерегулирований  $n \leq 1$ .

Проведенные ранее исследования показали, что экспериментальным подбором значений параметров регулятора найти их оптимальные величины затруднительно [18]. В подобных САР возможно возникновение существенных пульсаций светового потока светильников со значительным перерегулированием, а также работа в колебательном режиме. В САР освещенности целесообразно применение ПИ-регулятора, обеспечивающего требуемые показатели качества САР со статической ошибкой, близкой к нулю.

Целью настоящей работы является определение параметров ПИ-регулятора цифровой САР освещенности в клетках для содержания сельскохозяйственной птицы, обеспечивающих требуемые показатели качества процесса регулирования.

**Обзор литературы.** Учеными рассматриваются параметры цифровой ПИ-регулятора – пропорциональный коэффициент и постоянная времени интегрирования<sup>1</sup>. Также для цифрового регулятора в качестве варьируемого параметра может выступать время дискретизации [19; 20]. Для определения параметров регулятора в отечественной и зарубежной практике применяются аналитические и экспериментальные методы расчета, такие как ВТИ, СибТехЭнерго, метод заданного затухания, Копеловича, Стогестада, Циглера – Никольса, Куна, Шеделя, AMIGO, Чина-Хронеса-Ресвика (CHR), численной оптимизации и др.<sup>2</sup> [21–29].

Одним из наиболее известных экспериментальных методов определения параметров регулятора является метод Циглера – Никольса, основанный на получении графика переходного процесса САР на границе устойчивости системы<sup>3</sup> [26–29]. Однако применение его не всегда возможно и не гарантирует оптимальных показателей качества переходного процесса<sup>4</sup> [29].

Метод CHR<sup>5</sup> [28; 29] является развитием метода Циглера – Никольса и основан на анализе отклика объекта регулирования на ступенчатое тестовое воздействие. Данный метод позволяет получить больший запас устойчивости системы<sup>6</sup> [29]. Расчет пропорционального коэффициента  $k_p$  и приведенной постоянной времени интегрирования  $T_I$  по методу CHR для аperiodического переходного процесса минимальной длительности при известных характеристиках объекта регулирования может быть произведен по выражениям:

$$k_p = \frac{0,35T_{\text{об}}}{k_{\text{об}}\tau_{\text{об}}}, \quad (1)$$

$$T_I = 1,2T_{\text{об}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{об}}$  – коэффициент передачи объекта регулирования;  $T_{\text{об}}$  – постоянная времени объекта, с;  $\tau_{\text{об}}$  – запаздывание на объекте, с.

<sup>1</sup> Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов [и др.]. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.

<sup>2</sup> Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора // Информационные системы и технологии : Сб. мат-лов XXV Междунар. науч.-техн. конф. Н. Новгород : НГТУ им. П. Е. Алексеева, 2019. С. 634–640. EDN: ZIFTIM; Гусаров А. В., Кошляков П. С. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для систем с малыми постоянными времени // Технические науки в России и за рубежом : мат-лы VIII Междунар. науч. конф. (20–23 июня 2019 г., г. Краснодар). Краснодар : Новация, 2019. С. 22–23. EDN: CSVHOR; Чернов Б. А. Настройка систем автоматического управления и регулирования : учеб. пособие для магистрантов специальности 6М070200 – Автоматизация и управление. Алматы : НАО АУЭС, 2019. 87 с.; Копелович А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960. 192 с.

<sup>3</sup> Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора.

<sup>4</sup> Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов [и др.]; Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора.

<sup>5</sup> Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора; Гусаров А. В., Кошляков П. С. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для систем с малыми постоянными времени.

<sup>6</sup> Гусаров А. В., Кошляков П. С. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для систем с малыми постоянными времени.

Длительную проверку временем прошел метод ВТИ<sup>7</sup>. Приближенные формулы для вычисления параметров настройки регуляторов по данному методу были получены на моделях объектов и реальных регуляторов с присущими им нелинейностями. В качестве критерия параметрической оптимизации в формулах ВТИ приняты степень затухания  $\varphi = 75\%$  и интегральная квадратичная оценка качества, близкая к минимуму. Расчет  $k_p$  и  $T_I$  по методу ВТИ для относительного запаздывания на объекте регулирования  $\tau_{\text{ОБ}}/T_{\text{ОБ}} = 0,2-1,5$  производится по формулам:

$$k_p = \frac{0,38(\tau_{\text{ОБ}}/T_{\text{ОБ}} + 0,6)}{k_{\text{ОБ}}(\tau_{\text{ОБ}}/T_{\text{ОБ}} - 0,08)}; \quad (3)$$

$$T_I = 0,8T_{\text{ОБ}}. \quad (4)$$

В отечественной практике<sup>8</sup> простотой определения приближенных параметров настройки регуляторов отличается метод, опубликованный А. П. Копеловичем<sup>9</sup>. Определение  $k_p$  и  $T_I$  по методу Копеловича для апериодического переходного процесса минимальной длительности производится по выражениям:

$$k_p = \frac{0,6T_{\text{ОБ}}}{k_{\text{ОБ}}\tau_{\text{ОБ}}}; \quad (5)$$

$$T_I = 0,8\tau_{\text{ОБ}} + 0,5T_{\text{ОБ}}. \quad (6)$$

**Материалы и методы.** В работе использованы элементы математической статистики, теории планирования экспериментальных исследований, корреляционно-регрессионного анализа, теории автоматического управления и компьютерного моделирования. Обработка экспериментальных исследований выполнялась в программе Microsoft Office Excel.

Компьютерное моделирование проводилось в среде динамического моделирования SimInTech с использованием метода интегрирования Эйлера. Постоянный шаг интегрирования  $4,883 \cdot 10^{-7}$  с принят с учетом частоты и разрядности ШИМ-сигналов токов светоизлучающих диодов (далее – СИД). Расчеты параметров ПИ-регулятора производились по методам CHR, ВТИ и Копеловича.

Объектом исследования является цифровая САР освещенности клеток для содержания сельскохозяйственной птицы. Исследования проводились на лабораторном образце цифровой системы динамического локального освещения, изображенном на рисунке 1, который включает в себя управляющий программируемый логический контроллер (далее – ПЛК) Trim5 фирмы Segnetics, многоканальный светодиодный драйвер (далее – драйвер СИД) и плату управления с микроконтроллером ATmega328P, светодиодные светильники, датчик освещенности и дополнительное электрооборудование [10]. На боковой панели стенда расположен разъем для подключения внешних светильников и датчика освещенности (далее – ДО).

<sup>7</sup> Чернов Б. А. Настройка систем автоматического управления и регулирования.

<sup>8</sup> Там же; Корелин О. Н., Станкевичус А. А. Исследование и анализ методов настройки ПИД-регулятора.

<sup>9</sup> Копелович А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов.



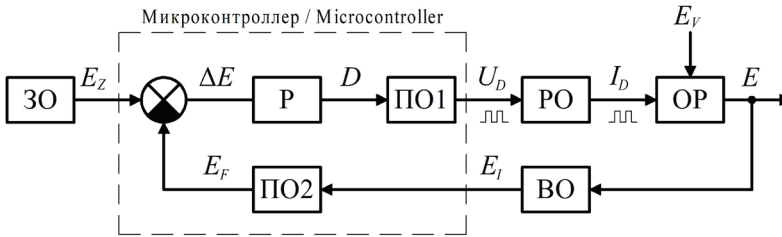
Р и с. 1. Лабораторный образец цифровой системы динамического локального освещения.  
Автор фотографии Е. А. Шабаев, 2023 г.

F i g. 1. Laboratory sample of a digital dynamic local lighting system.  
The photo by E.A. Shabaev, 2023

К лабораторной установке (рис. 1) был подключен отдельный компактный светодиодный светильник [30] системы локального динамического освещения, закрепленный на подвесе и цифровой ДО на базе микросхемы ОРТ3001. Расстояние от светильника до воспринимающей поверхности датчика равно 0,5 м. На этом расстоянии светильник создает максимальную освещенность 51,4 лк. Диапазон изменения светового потока составляет от 0 до 100 %, КЦТ – от 2 660 до 5 640 К. Управление токами СИД теплого и холодного свечения осуществляется двумя ШИМ-сигналами с частотой 2 кГц и разрядностью 10 бит.

Функциональная схема исследуемой системы изображена на рисунке 2. Объектом регулирования (далее – ОР) в данной САР является клетка для содержания птицы с размещенным светодиодным светильником. Функцию задающего органа (далее – ЗО) выполняет ПЛК. Воспринимающим органом (далее – ВО) служит цифровой ДО. Светодиодный драйвер представляет собой регулирующий орган (далее – РО). Микроконтроллер (далее – МК) осуществляет функции преобразующих органов (далее – СО, ПО1, ПО2) и регулятора. ПО1 формирует ШИМ-сигналы управления, ПО2 производит фильтрацию сигнала датчика освещенности. Регулируемой величиной является освещенность  $E$ , создаваемая на дне кормушки. За основное возмущение принято изменение фоновой освещенности  $E_v$  в помещении. Величина  $E$  поддерживается на заданном уровне за счет изменения регулирующего воздействия  $I_D$  – токов в режиме ШИМ-управления, протекающих через светодиоды светильника. Задающим сигналом САР является заданный уровень освещенности на контрольной поверхности  $E_z$ .



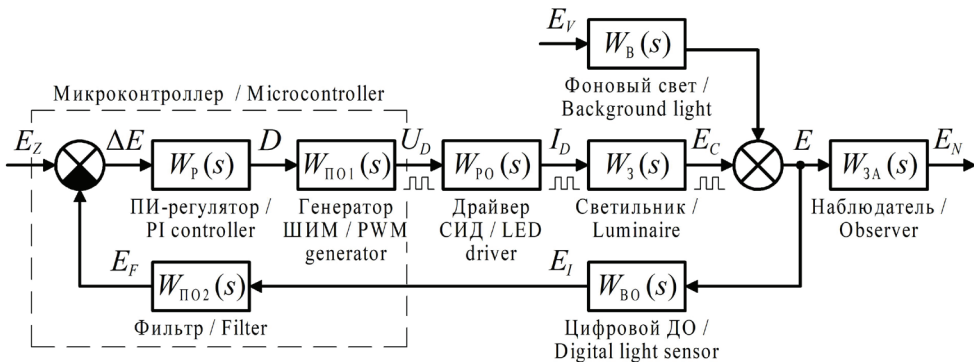


Р и с. 2. Функциональная схема цифровой САР освещенности  
 F i g. 2. Functional diagram of digital ACS of lighting

Источник: здесь и далее в статье все изображения составлены авторами.  
 Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

Исследуемая САР работает следующим образом. Контроль текущего уровня освещенности  $E$  производится датчиком освещенности, который на выходе формирует цифровой сигнал измеренной освещенности  $E_I$  и передает его через интерфейс I<sup>2</sup>C на МК платы управления. В МК производится сглаживание результатов измерений освещенности  $E_I$  цифровым фильтром и сравнение сигнала освещенности на выходе фильтра  $E_F$  с заданным значением  $E_Z$ . В результате этого образуется сигнал рассогласования  $\Delta E = E_Z - E_F$ . Заданное значение освещенности формирует ПЛК и передает его через интерфейс RS-485 в МК. Микроконтроллер по сигналу  $\Delta E$  с учетом требуемого КЦТ оптического излучения, принятого закона управления и настроек регулятора вычисляет коэффициенты заполнения  $D$  ШИМ-импульсов и формирует соответствующие ШИМ-сигналы  $U_D$  напряжения. Данные сигналы поступают в драйвер СИД и осуществляют управление выходными транзисторами, используемыми для стабилизации и ШИМ-регулирования токов  $I_D$  через светодиоды светильников.

На основе функциональной схемы была составлена структурная схема цифровой САР освещенности (рис. 3). При этом приняты следующие допущения: квантование сигнала освещенности  $E_I$  по уровню ДО является несущественным; не учтено температурное изменение светового потока СИД; влияние температуры драйвера СИД на точность стабилизации тока СИД незначительно; выходная характеристика драйвера СИД является абсолютно линейной [31].



Р и с. 3. Структурная схема цифровой САР освещенности  
 F i g. 3. Block diagram of digital ACS of lighting



Практическое функционирование исследуемой САР характеризуется широким диапазоном заданного уровня освещенности.

Выходная величина  $E_C$  (рис. 3) – освещенность, создаваемая светодиодами светильника в режиме ШИМ-токов. Передаточная функция наблюдателя  $W_{3A}(s)$  добавлена в структурную схему для оценки качества регулирования освещенности  $E_N$  на контрольной поверхности с учетом особенностей зрительного аппарата человека.

Динамические свойства объекта регулирования и элементов САР освещенности описываются следующими передаточными функциями и математическими выражениями.

Передаточная функция объекта регулирования по задающему воздействию для теплого и холодного канала свечения:

$$W_{3W}(s) = k_{EW}; \tag{7}$$

$$W_{3C}(s) = k_{EC}, \tag{8}$$

где  $s$  – оператор передаточной функции в преобразовании Лапласа.

Передаточные коэффициенты  $k_{EW}$  и  $k_{EC}$  светодиодного светильника для каналов теплого и холодного свечения:

$$k_{EW} = \frac{E_W}{I_{DW}} = \frac{E_{MAX}}{I_A(1+1/k_{WC})}; \tag{9}$$

$$k_{EC} = \frac{E_C}{I_{DC}} = \frac{E_{MAX}}{I_A(1+k_{WC})}, \tag{10}$$

где  $E_W$  и  $E_C$  – освещенности, создаваемые СИД теплого и холодного свечения, лк;  $I_{DW}$  и  $I_{DC}$  – действующие значения токов, протекающих через СИД теплого и холодного свечения, А;  $E_{MAX} = 51,4$  лк – максимальная освещенность, создаваемая светильником;  $I_A = 0,1$  А – амплитудное значение ШИМ-сигналов тока СИД;  $k_{WC} = 0,9274$  – коэффициент соотношения освещенностей, создаваемых «теплым» и «холодным» СИД светильника.

Передаточная функция объекта регулирования по возмущению:

$$W_B(s) = 1. \tag{11}$$

Передаточная функция зрительного аппарата наблюдателя:

$$W_{3A}(s) = \frac{1}{T_{ZA}s + 1}, \tag{12}$$

где  $T_{ZA} = 0,05-0,20$  с – постоянная времени [18].

Цифровой ДО производит измерение сигнала по следующему алгоритму: сначала выполняется суммирование измеряемой освещенности в течении времени интегрирования, затем определяется среднее значение и формируется конечный результат

измерений с учетом 12-битного разрешения сигнала. Уравнение, описывающее процесс измерения освещенности датчиком, может быть представлено в виде:

$$E_I = \frac{\sum E_J \tau_J}{\tau_{DO}}, \quad (13)$$

где  $\tau_{DO} = 0,1$  с – время интегрирования цифрового ДО;  $\tau_J$  – время преобразования сигнала АЦП, с;  $E_J$  – освещенность единичного измерения АЦП.

Также необходимо учитывать время, затрачиваемое на обработку данных измерений датчиком и их передачу через интерфейс I<sup>2</sup>C. Экспериментально установлено, что суммарно обработка и передача данных датчиком освещенности занимает  $\tau_{ZDO} = 3,0041 \cdot 10^{-3}$  с.

Передаточная функция цифрового фильтра в линейном представлении описывается уравнением аperiодического звена первого порядка:

$$W_{\text{ПО2}}(s) = \frac{1}{T_F s + 1}, \quad (14)$$

где  $T_F$  – постоянная времени фильтра, с.

Сигнал рассогласования СО запишем как:

$$\Delta E = E_Z - E_F. \quad (15)$$

Передаточная функция цифрового ПИ-регулятора в линейном представлении выглядит как:

$$W(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) = k_p \left( 1 + \frac{k_I}{s} \right), \quad (16)$$

где  $k_I$  – интегральный коэффициент ПИ-регулятора.

Напряжения на выходах генераторов ШИМ-сигналов для управления СИД теплым и холодным свечением могут быть определены исходя из условий:

$$U_{DW} = \begin{cases} U_A, & \text{если } t = t_{ONW}; \\ 0, & \text{если } t = t_{OFFW}; \end{cases} \quad (17)$$

$$U_{DC} = \begin{cases} U_A, & \text{если } t = t_{ONC}; \\ 0, & \text{если } t = t_{OFFC}; \end{cases} \quad (18)$$

где  $U_A = 5$  В – амплитуда напряжения ШИМ-сигналов управления;  $t_{ONW}$  и  $t_{ONC}$  – продолжительность импульса ШИМ-сигнала для СИД теплого и холодного свечения, с;  $t_{OFFW}$  и  $t_{OFFC}$  – продолжительность паузы ШИМ-сигнала для СИД теплого и холодного свечения, с.

$$t_{ONW} = \frac{1}{D_w f}; \quad (19)$$

$$t_{ONC} = \frac{1}{D_c f}; \quad (20)$$

$$t_{OFFW} = \frac{1}{f} - t_{ONW}; \quad (21)$$

$$t_{OFFC} = \frac{1}{f} - t_{ONC}, \quad (22)$$

где  $D_w$  и  $D_c$  – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала тока СИД теплого и холодного свечения;  $f = 2000$  Гц – частота ШИМ-сигналов.

Коэффициенты  $D_w$  и  $D_c$  зависят от требуемой КЦТ оптического излучения. При моделировании необходимо учитывать период выполнения цикла программы, среднее значение которого составляет  $\tau_{MC} = 1,021 \cdot 10^{-3}$  с (определено экспериментально).

Передаточные функции драйвера СИД теплого и холодного каналов свечения описываются выражениями:

$$W_{POW}(s) = k_U; \quad (23)$$

$$W_{POC}(s) = k_U, \quad (24)$$

где  $k_U = 0,02$  А/В – передаточный коэффициент драйвера СИД.

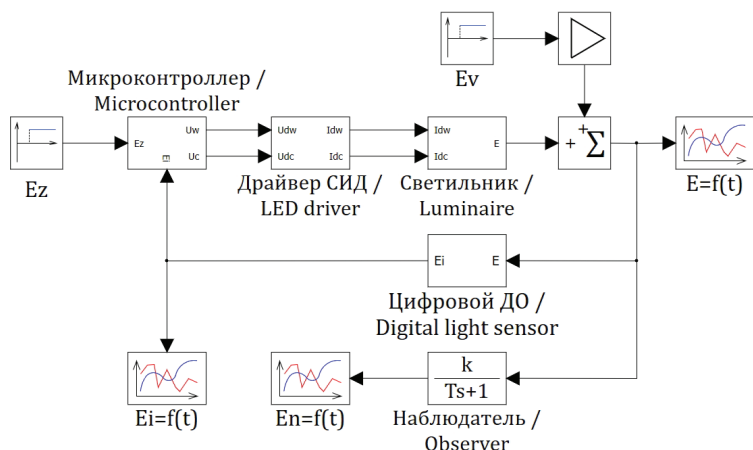
В экспериментах по снятию кривых переходных процессов на лабораторной установке в качестве задающего органа использовался ПК. Возмущение создавалось на программном уровне путем ступенчатого изменения коэффициентов заполнения ШИМ-сигнала токов СИД на величину, соответствующую  $E_v$ . Опытные данные записывались на ПК, считывание данных с МК осуществлялось через интерфейс UART с помощью встроенного преобразователя UART<=>USB. Разработка экспериментальной программы для МК платы управления произведена с использованием программного обеспечения FLProg и ArduinoIDE на языках программирования FBD и Arduino C. Количество повторностей для каждого опыта с различными значениями  $E_z$  и  $E_v$  равно 10. Для каждой повторности использовалось случайное смещение начала времени интегрирования ДО. При моделировании задавался шаг смещения начала времени интегрирования датчика 10 мс.

**Результаты исследования.** На основе структурной схемы САР освещенности (рис. 3) и описания ее основных элементов была составлена структурная схема моделирования САР в среде SimInTech (рис. 4).

В структурной схеме моделирования (рис. 4) блоки «ПЛК», «МК», «Драйвер СИД», «Светильник», «Цифровой ДО» являются субмоделями. Структура главной субмодели «МК» представлена на рисунке 5.

Блоки «Расчет D» и «Генератор ШИМ» (рис. 5) реализованы с использованием текстового языка программирования, встроенного в SimInTech. В блоке «Расчет D» происходит расчет коэффициентов заполнения ШИМ-сигналов токов СИД теплого и холодного свечения в зависимости от требуемой КЦТ оптического излучения. Моделирование проведено для КЦТ, равной 3779,57 К, которая соответствует максимальной освещенности, создаваемой светильником.

Блок «Генератор ШИМ» формирует ШИМ-сигналы напряжения в соответствии с уравнениями (17–22) для управления токами через СИД теплого и холодного свечения. Блоки «Задержка МК» учитывают задержку на период выполнения цикла программы.



Р и с. 4. Структурная схема моделирования цифровой САР в среде SimInTech  
 F i g. 4. Simulation block diagram of digital ACS of lighting in the SimInTech program

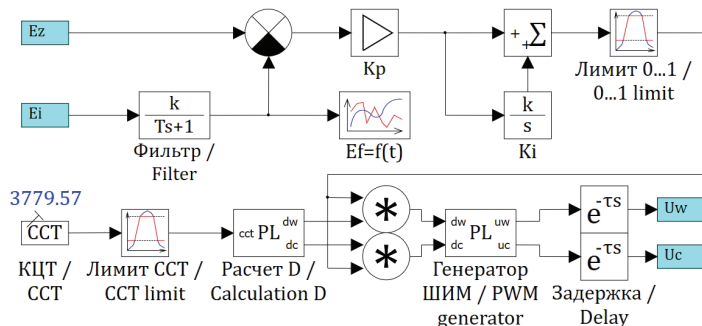


Рис. 5. Структура субмодели блока «Микроконтроллер»  
 Fig. 5. Structure of the submodel of the «Microcontroller» block

В разработанной компьютерной модели цифровой САР освещенности в среде SimInTech дискретизация по уровню и времени ШИМ-сигналов напряжения реализуется с помощью блока «Генератор ШИМ» (рис. 5) и постоянного шага интегрирования, равного минимальной ширине импульса ШИМ напряжений.

*Определение параметров обобщенного объекта регулирования.* В соответствии с методами ЧНР, ВТИ и Копеловича для расчета параметров ПИ-регулятора требуются значения коэффициента передачи  $k_{об}$ , постоянной времени  $T_{об}$  и запаздывания  $\tau_{об}$  обобщенного объекта регулирования, который включает в себя все элементы САР освещенности, кроме задающего, сравнивающего и непосредственно регулятора. Эти параметры объекта могут быть рассчитаны аналитически или определены графически по кривым разгона.

Коэффициент передачи  $k_{об}$  численно равен значению максимальной освещенности, создаваемой светильником, следовательно,  $k_{об} = 51,4$ . Параметр  $T_{об}$  определяется постоянной времени фильтра, то есть  $T_{об} = T_F = 0,125$  с. Общее запаздывание

в системе складывается из продолжительности интегрирования  $\tau_{DO}$  цифрового ДО, задержки на обработку данных измерений и их передачу  $\tau_{ZDO}$ , периодом выполнения цикла программы  $\tau_{MC}$ :  $\tau_{об} = \tau_{DO} + \tau_{ZDO} + \tau_{MC} = 1,04 \cdot 10^{-3}$  с.

*Определение параметров ПИ-регулятора, оценка качества процесса регулирования.* В соответствии с выбранными методами CHR, ВТИ и Копеловича по выражениям (1–6) произведены расчеты параметров ПИ-регулятора, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

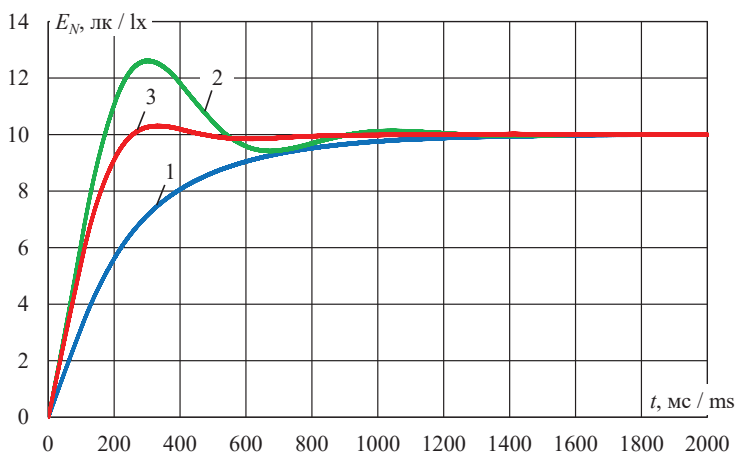
Table 1

**Параметры настройки ПИ-регулятора для разных методов расчета**  
**PI controller tunings for different calculation methods**

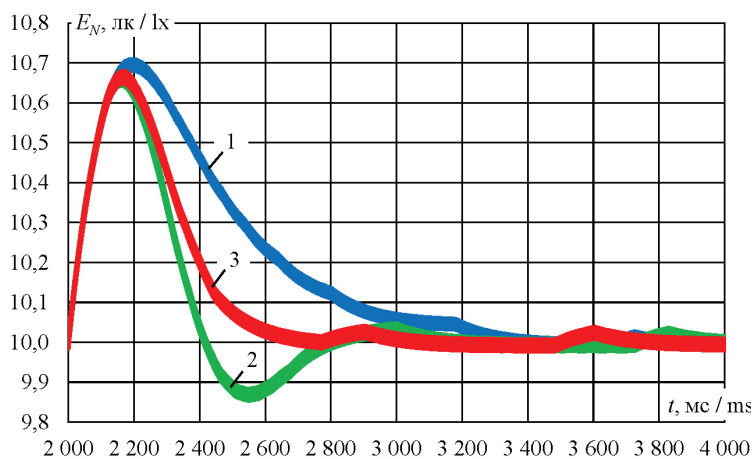
Метод / Method	$k_p$	$T_i$
CHR	$8,182 \cdot 10^{-3}$	150 мс / ms
ВТИ / VTI	$14,076 \cdot 10^{-3}$	100 мс /ms
Копеловича / Kopelovich	$14,027 \cdot 10^{-3}$	145,72 мс / ms

*Источник:* здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.  
*Source:* Hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

Путем компьютерного моделирования были получены переходные процессы САР для настроек ПИ-регулятора, представленных в таблице 1. Кривые разгона для задающего воздействия  $E_Z = 10$  лк соответствуют времени моделирования  $t_M = 0-2$  с, для положительного и отрицательного возмущений –  $t_M = 2-4$  с и  $t_M = 4-6$  с. Первое ступенчатое изменение фоновой освещенности от 0 до 1 лк ( $\Delta E_V = +1$  лк) произведено при  $t_M = 2$  с, второе – от 1 до 0 лк ( $\Delta E_V = -1$  лк) при  $t_M = 4$  с. Результаты моделирования представлены на рисунках 6 и 7, где кривые 1, 2 и 3 соответствуют настройкам ПИ-регулятора, определенным по методам CHR, ВТИ и Копеловича.



Р и с. 6. Переходные процессы САР по задающему воздействию  
 F i g. 6. Transient processes in ACS for a master control



Р и с. 7. Переходные процессы САР по возмущению  
F i g. 7. Transient processes in ACS for a perturbation action

Визуальный анализ кривых переходных процессов САР, изображенных на рисунке 6, показывает, что наилучшее качество переходного процесса по задающему воздействию обеспечивают параметры ПИ-регулятора, полученные по методу Копеловича. Переходный процесс САР для параметров регулятора, вычисленных по методу СНР, обеспечивает аperiodический переходный процесс без перерегулирования, но имеет большое время регулирования. Переходный процесс при настройках регулятора, полученных по методу ВТИ, характеризуется значительным (более 25 %) перерегулированием.

Анализ кривых переходных процессов по возмущению (рис. 7) показывает, что параметры ПИ-регулятора, полученные по методу Копеловича, также обеспечивают лучшее качество регулирования.

За счет ШИМ-управления токами светодиодов освещенность  $E_N$  колеблется с амплитудой 17 мкк относительно среднего за период (0,5 мс) значения. На графиках переходных процессов, изображенных на рисунке 7 в увеличенном масштабе, это проявляется в увеличении толщины кривых 1, 2 и 3 на горизонтальных участках.

Рассчитанные показатели качества регулирования САР освещенности при настройках регулятора, полученных по методу Копеловича, удовлетворяют исходным требованиям (табл. 2).

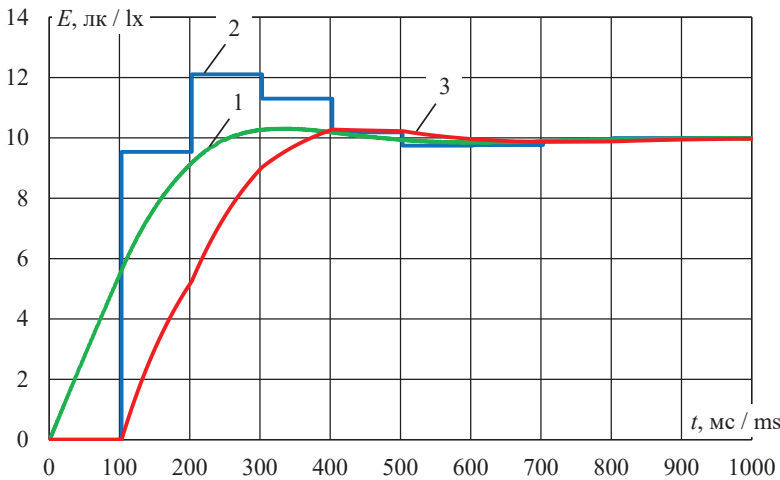
Оценка качества регулирования САР произведена для освещенности  $E_N$ , которая характеризует воздействие света на наблюдателя с учетом инерционности его зрительного аппарата при восприятии импульсного светового потока (кривая 1 на рис. 8).

Несмотря на существенную дискретизацию по времени сигнала  $E_f = f(t)$  на выходе датчика освещенности, за счет равенства постоянных времени цифрового фильтра  $T_F$  и зрительного аппарата наблюдателя  $T_{Za}$  получен эффект идентичности кривых  $E_f = f(t)$  и  $E_N = f(t)$  со сдвигом по времени около 103 мс (рис. 8). Это позволяет САР более корректно формировать управляющее воздействие с помощью ПИ-регулятора, что способствует улучшению качества регулирования.



**Показатели качества регулирования САР**  
**Regulator performance indicators of ACS**

Показатель качества / Regulator performance	Задающее воздействие / Master control	Возмущающее воздействие / Perturbation action
Статическая ошибка $\Delta E_{CT}$ , лк / Static error $\Delta E_{CT}$ , лк	$\approx 0$	$\approx 0$
Время регулирования $t_p$ , мс / Control time $t_p$ , ms	384,16	382,35
Перерегулирование $\sigma$ , % / Overshoot $\sigma$ , %	3,18	6,80
Число перерегулирований $n$ / Number of overshoots $n$	1	1

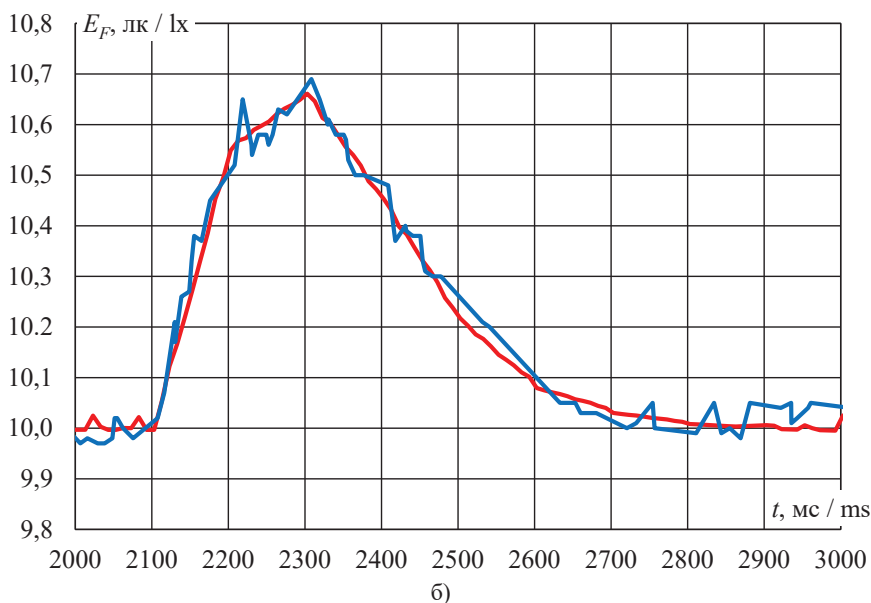
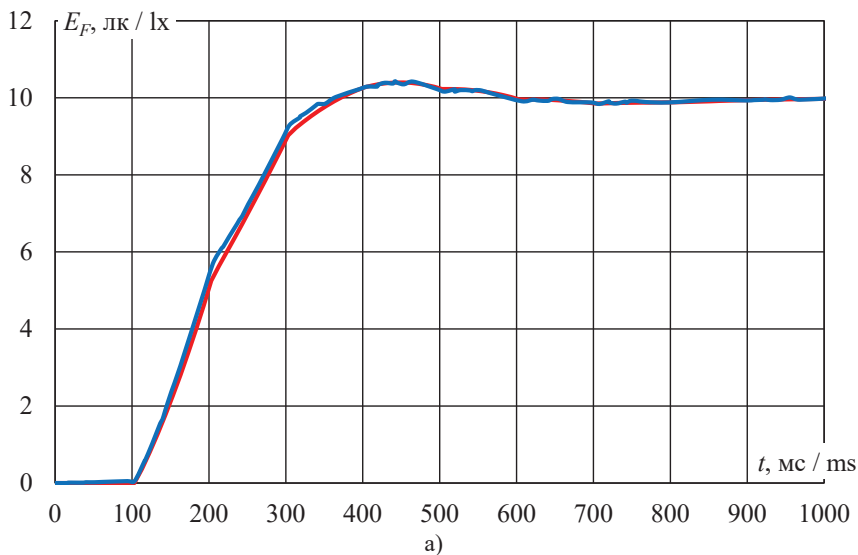


Р и с. 8. Переходные процессы в САР по задающему воздействию  
 при  $E_z = 10$  лк: 1 –  $E_N$ , 2 –  $E_p$ , 3 –  $E_F$

F i g. 8. Transient processes in ACS for a master control for  $E_z = 10$  lx: 1 –  $E_N$ , 2 –  $E_p$ , 3 –  $E_F$

*Экспериментальная проверка модели САР освещенности.* С целью оценки достоверности результатов компьютерного моделирования САР освещенности проведен ряд натурных экспериментов по получению данных изменения во времени освещенности  $E_F$  на выходе цифрового фильтра при ступенчатых задающем и возмущающих воздействиях. Опыты проводились на лабораторной установке, изображенной на рисунке 1. При этом задающее и возмущающие воздействия создавались аналогично проведенному компьютерному моделированию, результаты которого отображены на рисунках 6 и 7.

Наглядное сравнение реального переходного процесса в САР с результатами компьютерного моделирования для  $E_z = 10$  лк и КЦТ = 3779,57 К возможно путем сопоставления кривых, которые приведены на рисунке 9. Графики переходных процессов  $E_F = f(t)$  построены по результатам обработки экспериментальных данных 10 опытов.



Р и с. 9. Переходные процессы в реальной САР (синяя линия)

и в ее компьютерной модели (красная линия) для  $E_z = 10$  лк:

а) по задающему воздействию; б) по возмущению при  $\Delta E_v = +10\%$

Fig. 9. Transient processes in a real ACS (blue line) and in its computer model (red line) for  $E_z = 10$  lx: a) for a master control; b) for a perturbation action equal to  $\Delta E_v = +10\%$

Визуально результаты моделирования САР освещенности хорошо сопоставляются с кривыми разгона реальной системы (рис. 9), наблюдается очевидное сходство всех характерных участков кривых. Численная оценка совпадения

экспериментальных данных с результатами моделирования произведена по коэффициенту детерминации для продолжительности переходных процессов, равной 1 с по задающему воздействию и возмущениям. Сопоставление точек расчета производилось при одинаковом времени, в качестве исходных значений по времени принимались опытные данные реального переходного процесса, при необходимости результаты моделирования для заданного времени определялись интерполированием значений освещенностей для двух ближайших моментов времени. Совпадение кривых переходных процессов (рис. 9) на уровне  $R^2 > 98\%$  (табл. 3) может служить оценкой высокой точности разработанной компьютерной модели САР освещенности.

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

Оценка совпадения переходных процессов  
Estimation of the coincidence of transient processes

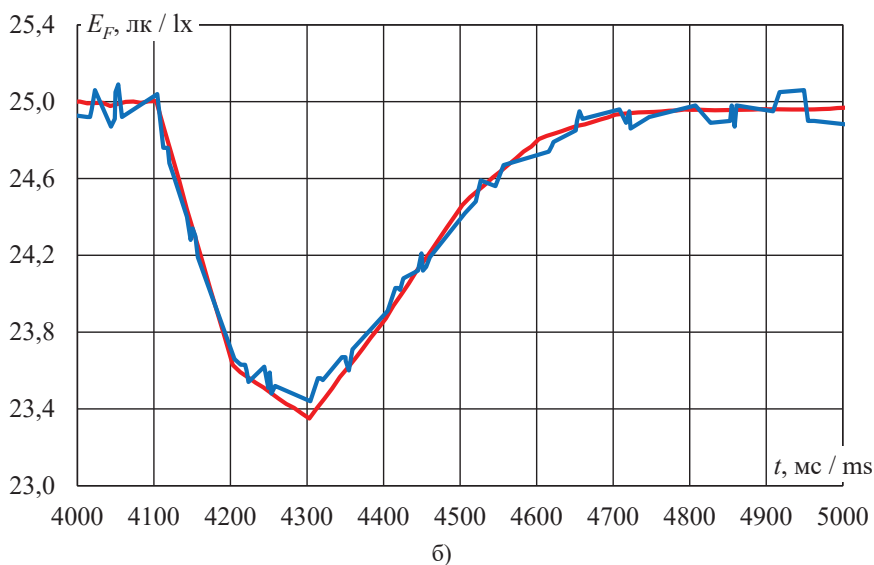
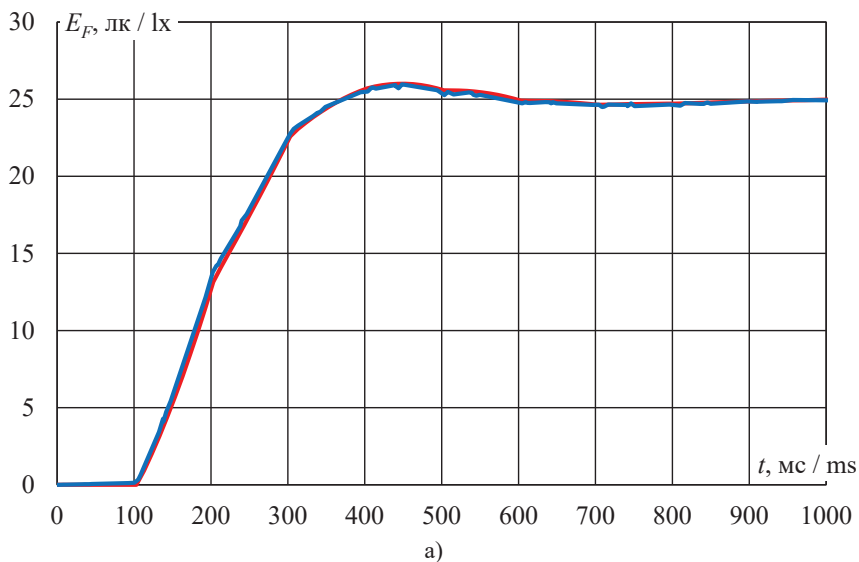
$E_z$ , лк / lx	$R^2$ по задающему воздействию / $R^2$ for a master control	$\Delta E_v$ , лк / lx	$R^2$ по возмущению / $R^2$ for a perturbation
1	0,9887	+0,5	0,9357
		-0,5	0,9050
10	0,9993	+1,0	0,9828
		-1,0	0,9857
25	0,9995	+2,5	0,9913
		-2,5	0,9906

Дополнительно аналогичным образом произведена оценка точности модели САР освещенности для других значений  $E_z$  и  $\Delta E_v$  (табл. 3; рис. 10, 11). Анализ данных, представленных в таблице 3, показывает, что с увеличением заданного значения уровня освещенности (рис. 10) коэффициент детерминации повышается.

Для  $E_z = 1$  лк (рис. 11), несмотря на высокое значение коэффициента детерминации по задающему воздействию ( $R^2 = 0,9887$ ), перерегулирование в реальной САР на 4,6 % выше относительно компьютерной модели. Переходный процесс по возмущению в реальной САР характеризуется более быстрым выходом на установившееся значение по сравнению с моделью.

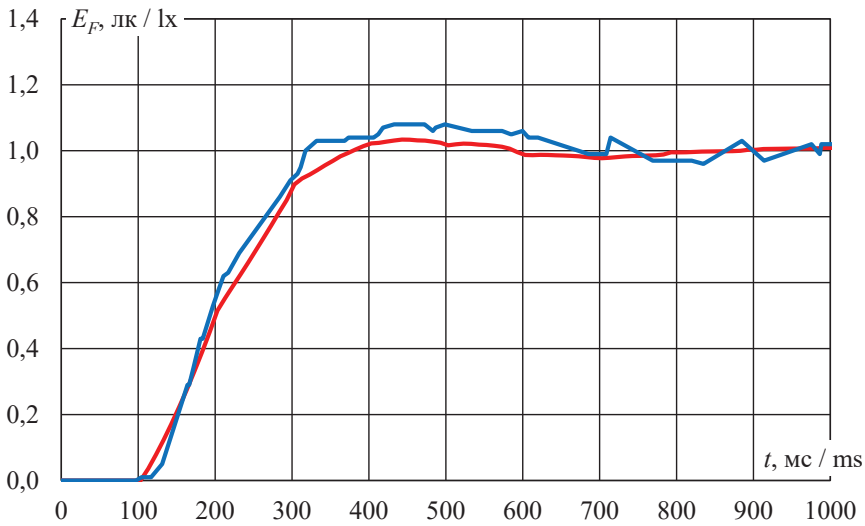
Ухудшение совпадения кривых переходных процессов в реальной САР и в ее компьютерной модели на малых уровнях заданной освещенности (рис. 11) связано с более существенным влиянием погрешностей измерений, помех и принятых в модели допущений. Несмотря на это, для  $E_z = 1$  лк модель достаточно достоверно описывает переходные процессы в САР, а используемые настройки ПИ-регулятора обеспечивают требуемое качество регулирования освещенности.

**Обсуждение и заключение.** Разработанная модель цифровой САР освещенности и программное обеспечение SimInTech позволили провести исследование данной САР методом компьютерного моделирования.

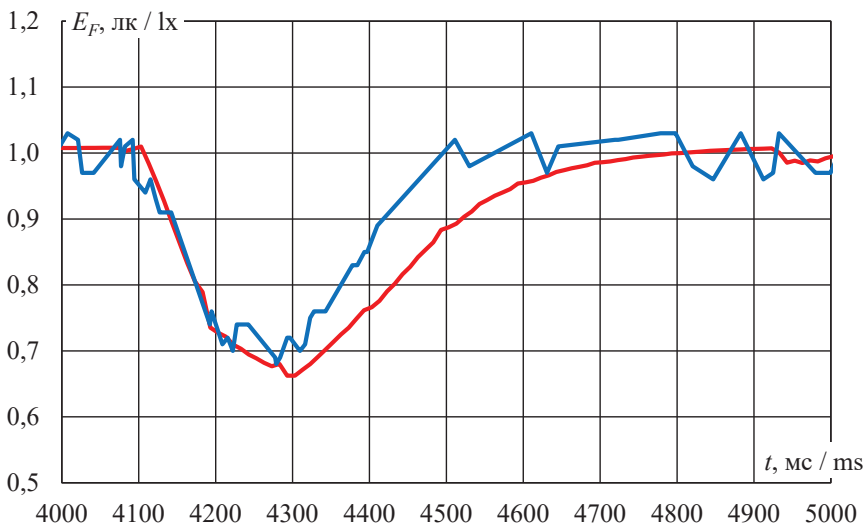


Р и с. 10. Переходные процессы в реальной САР (синяя линия) и в ее компьютерной модели (красная линия) для  $E_z = 25$  лк: а) по задающему воздействию; б) по возмущению при  $\Delta E_v = -10\%$

F i g. 10. Transient processes in a real ACS (blue line) and in its computer model (red line) for  $E_z = 25$  lx: a) for a master control; b) for a perturbation action equal to  $\Delta E_v = -10\%$



а)



б)

Р и с. 11. Переходные процессы в реальной САР (синяя линия) и в ее компьютерной модели (красная линия) для  $E_z = 1$  лк: а) по задающему воздействию; б) по возмущению при  $\Delta E_v = -0,5$  лк  
 Fig. 11. Transient processes in a real ACS (blue line) and in its computer model (red line) for  $E_z = 1$  lx: а) for a master control; б) for a perturbation action equal to  $\Delta E_v = -0.5$  lx

Выбор методов нахождения рабочих настроек цифрового ПИ-регулятора следует производить с учетом наличия дискретизации сигналов по уровню и во времени цифровыми элементами САР освещенности. Для снижения влияния помех и более корректного формирования регулятором управляющего воздействия с учетом восприятия импульсного светового потока наблюдателем следует использовать

цифровой фильтр. Высокие показатели качества регулирования цифровой САР обеспечило применение ПИ-регулятора с настройками  $k_p = 14,027 \cdot 10^{-3}$  и  $T_I = 145,72$  мс, рассчитанными по методу Копеловича.

Сравнительная оценка переходных процессов по задающему и возмущающим воздействиям в реальной САР, реализованной на лабораторной установке, и в компьютерной модели данной системы позволяет сделать вывод о высокой точности разработанной модели и корректности выбора параметров моделирования в среде SimInTech. При малых уровнях заданной освещенности на функционировании САР ожидаемо больше сказываются помехи и сильнее проявляется влияние допущений, принятых при разработке компьютерной модели. Экспериментально установлено, что требуемое качество процесса регулирования САР обеспечивается для широкого диапазона заданной освещенности: от 1 до 25 лк.

Разработанная САР освещенности с ПИ-регулятором может быть использована в цифровой системе динамического локального освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы. Перспективно использование разработанной модели САР и компьютерного моделирования в среде SimInTech для уточнения оптимальных настроек ПИ- или ПИД-регулятора с помощью параметрической оптимизации при различных сочетаниях освещенности и КЦТ оптического излучения и создания адаптивной САР освещенности с изменяемыми настройками регулятора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусаев А. М. Влияние дневных и ночных ритмов на продуктивность японского перепела (*Jaropnicus coturnix L*) // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (34). С. 53–56. URL: [https://vestnik.bsau.ru/netcat\\_files/vestnic/file/2015-34.pdf](https://vestnik.bsau.ru/netcat_files/vestnic/file/2015-34.pdf) (дата обращения: 30.10.2023).
2. Significance of Light in Poultry Production: A Review / S. J. Patel [et al.] // *Advances in Life Sciences*. 2016. Vol. 5, Issue 4. P. 1154–1160. URL: <https://elck.ru/3Au9hy> (дата обращения: 30.10.2023).
3. Influence of LED Bulb on Reproductive and Production Performance of Different Poultry Species: A Review / O. M. Oso [et al.] // *World's Poultry Science Journal*. 2022. Vol. 78, Issue 2. P. 515–529. <https://doi.org/10.1080/00439339.2022.2044273>
4. Soliman F. N. K., El-Sabroun K. Light Wavelengths/Colors: Future Prospects for Broiler Behavior and Production // *Journal of Veterinary Behavior*. 2020. Vol. 36. P. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2019.10.014>
5. Деткова А. Е. Зооигиеническая оценка параметров микроклимата содержания птицы родительского стада кросса Хайсекс Уайт // Молодежь и наука. 2018. № 6. С. 28. EDN: YADUNF
6. Lighting, Density, and Dietary Strategies to Improve Poultry Behavior, Health, and Production / K. El-Sabroun [et al.] // *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022. Vol. 10, Issue 1. Article no. 2212. <https://doi.org/10.31893/jabb.22012>
7. Impact of Housing Environment on the Immune System in Chickens: A Review / T. Hofmann [et al.] // *Animals*. 2020. Vol. 10, Issue 7. Article no. 1138. <https://doi.org/10.3390/ani10071138>
8. Локальное светодиодное освещение – путь повышения эффективности птицеводства / В. И. Фисинин [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 6. С. 61–62. EDN: MMXNCU
9. Thomson A., Corscadden K. W. Improving Energy Efficiency in Poultry Farms through LED Usage: A Provincial Study // *Energy Efficiency*. 2018. Vol. 11. P. 927–938. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9613-0>
10. Шабаев Е. А., Романовец М. М. Цифровая система динамического локального освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 1 (46). С. 26–30. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-26-30>



11. Shabaev E. A., Romanovets M. M. Mathematical Models of Sunlight for Dynamic Lighting Systems of Agricultural Objects // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659. Article no. 012110. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012110>
12. Способ локального динамического освещения клеток для содержания сельскохозяйственной птицы с моделированием естественной световой среды : патент 2797873 Российская Федерация / Шабаев Е. А., Романовец М. М. № 2022117323 ; заявл. 24.06.2022 ; опубл. 09.06.2023, Бюл. № 16. 7 с. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2797873C1/ru> (дата обращения: 30.10.2023).
13. Продуктивность кур при светодиодном освещении с изменяемой цветовой температурой / А. Ш. Кавтарашвили [и др.] // Птицеводство. 2017. № 3. С. 27–29. EDN: YLKCGV
14. Archer G. S. Color Temperature of Light-Emitting Diode Lighting Matters for Optimum Growth and Welfare of Broiler Chickens // *Animal*. 2018. Vol. 12, Issue 5. P. 1015–1021. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002361>
15. Дубровский А. А., Смирнова В. В. Использование светодиодного освещения с различной цветовой температурой при выращивании родительского стада птицы // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2020. № 4 (63). С. 188–195. URL: [https://www.mgau.ru/science/journal/PDF\\_files/vestnik\\_4\\_2020.pdf](https://www.mgau.ru/science/journal/PDF_files/vestnik_4_2020.pdf) (дата обращения: 30.10.2023).
16. Aldridge D. J., Scanes C. G., Kidd M. T. Performance and Preference of Broilers Provided Dual Light Warmth // *Journal of Applied Poultry Research*. 2021. Vol. 30, Issue 4. Article no. 100187. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100187>
17. Impact of Light Intensity or Choice of Intensity on Broiler Performance and Behavior / D. J. Aldridge [et al.] // *Journal of Applied Poultry Research*. 2022. Vol. 31, Issue 1. Article no. 100216. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100216>
18. Газалов В. С., Шабаев Е. А., Романовец М. М. Моделирование САР освещенности динамической системы освещения на RGB-светодиодах // АгроЭкоИнфо. 2019. № 2. 14 с. URL: [https://agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2019/st\\_223\\_annot.html](https://agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2019/st_223_annot.html) (дата обращения: 30.10.2023).
19. Мазуров В. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 3. Цифровые регуляторы и их настройка // Компоненты и технологии. 2003. № 6. С. 146–151. URL: <https://clck.ru/3AvWeU> (дата обращения: 30.10.2023).
20. Anuchin A. S. Calculation Techniques for Parameters of a Digital PI Controller in an Electrical Drive // *Russian Electrical Engineering*. 2014. Vol. 85. P. 290–297. <https://doi.org/10.3103/S1068371214050022>
21. Åström K. J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols Step Response Method for PID Control // *Journal of Process Control*. 2004. Vol. 14, Issue 6. P. 635–650. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.01.002>
22. Controller Tuning Method for Non-Linear Conical Tank System / G. Saravanakumar [et al.] // *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*. 2017. Vol. 1, Issue 2. P. 224–228. URL: <https://ssrn.com/abstract=2942425> (дата обращения: 30.10.2023).
23. Разработка методики определения оптимальных параметров настройки промышленных регуляторов / Т. А. Изосимова [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2020. № 3 (106). С. 5–20. URL: [https://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=1841#commentspost](https://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1841#commentspost) (дата обращения: 30.10.2023).
24. Metaheuristic Algorithms for PID Controller Parameters Tuning: Review, Approaches and Open Problems / S. B. Joseph [et al.] // *Heliyon*. 2022. Vol. 8, Issue 5. Article no. e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
25. Reinforcement Learning Approach to Autonomous PID Tuning / O. Dogru [et al.] // *Computers & Chemical Engineering*. 2022. Vol. 161. Article no. 107760. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107760>
26. Lolu S. J., Lolu G. D. Comparison of PID Tuning Methods for First Order Plus Time-Delay System // *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2018. Vol. 7, Issue 1. P. 36–47. URL: [https://ijarse.com/images/fullpdf/1515747909\\_J1006.pdf](https://ijarse.com/images/fullpdf/1515747909_J1006.pdf) (дата обращения: 30.10.2023).
27. Демин И. О., Саблина Г. В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия. 2020. № 1 (31). С. 174–181. URL: <https://jurnal.nips.ru/ru/node/127> (дата обращения: 30.10.2023).

28. Мазуров В. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования // Компоненты и технологии. 2003. № 5 (31). С. 114–118. URL: <https://clck.ru/3AvfNy> (дата обращения: 30.10.2023).

29. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 2 // Современная электроника и технологии автоматизации. 2008. № 1. С. 86–99. URL: <https://www.cta.ru/articles/spravochnik/v-zapisnyuu-knizhku-inzhenera/125043/> (дата обращения: 30.10.2023).

30. Шабаетв Е. А., Романовец М. М., Кулачинский В. А. Исследование нагрева светодиодов компактного светильника для системы локального освещения // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 1 (57). С. 78–86. [https://doi.org/10.55618/20756704\\_2022\\_15\\_1\\_78-86](https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_1_78-86)

31. Шабаетв Е. А., Романовец М. М., Кулачинский В. А. Исследование многоканального высоковольтного светодиодного драйвера // Вестник НГИЭИ. 2023. № 4 (143). С. 67–78. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-4-67-78>

## REFERENCES

1. Musayev A.M. Influence of Two Day and Two Night Rhythms on Productivity of Japanese Quail (*Japonicus Coturnix* L). *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2015;(2):53–56. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://vestnik.bsau.ru/netcat\\_files/vesnic/file/2015-34.pdf](https://vestnik.bsau.ru/netcat_files/vesnic/file/2015-34.pdf) (accessed 30.10.2023).

2. Patel S.J., Patel A.S., Patel M.D., Patel J.H. Significance of Light in Poultry Production: A Review. *Advances in Life Sciences*. 2016;5(4):1154–1160. Available at: <https://clck.ru/3Au9hy> (accessed 30.10.2023).

3. Oso O.M., Metowogo K., Oke O.E., Tona K. Influence of LED Bulb on Reproductive and Production Performance of Different Poultry Species: A Review. *World's Poultry Science Journal*. 2022;78(2):515–529. <https://doi.org/10.1080/00439339.2022.2044273>

4. Soliman F.N.K., El-Sabrouk K. Light Wavelengths/Colors: Future Prospects for Broiler Behavior and Production. *Journal of Veterinary Behavior*. 2020;36:34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2019.10.014>

5. Detkova A.E. Hygienic Evaluation of the Microclimate of the Poultry Parent Stock of Cross Hajseks White. *Youth and Science*. 2018;(6):28. EDN: YADUNF

6. El-Sabrouk K., El-Deek A., Ahmad S., Usman M., Dantas M.R.T., Souza-Junior J.B.F. Lighting, Density, and Dietary Strategies to Improve Poultry Behavior, Health, and Production. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2022;10(1):2212. <https://doi.org/10.31893/jabb.22012>

7. Hofmann T., Schmucker S., Bessei W., Grashorn M., Stefanski V. Impact of Housing Environment on the Immune System in Chickens: A Review. *Animals*. 2020;10(7):1138. <https://doi.org/10.3390/ani10071138>

8. Fisinin V.I., Kavtarashvili A.Sh., Novotorov E.N., Gladin D.N. Light-Emitting Diode Illumination – Morrow in Poultry Farming. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2011;(6):61–62. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: MMXNCU

9. Thomson A., Corscadden K.W. Improving Energy Efficiency in Poultry Farms through LED Usage: A Provincial Study. *Energy Efficiency*. 2018;11:927–938. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9613-0>

10. Shabaev E.A., Romanovets M.M. Digital System of Dynamic Local Lighting for Poultry Cages. *Electrical Technology and Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2022;69(1):26–30. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-26-30>

11. Shabaev E.A., Romanovets M.M. Mathematical Models of Sunlight for Dynamic Lighting Systems of Agricultural Objects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;659:012110. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012110>

12. Shabaev E.A., Romanovets M.M. [Method for Local Dynamic Lighting of Cages for Poultry with Simulation of Natural Light Environment]. Patent 2,797,873 Russian Federation. 2023 June 09. 7 p. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2797873C1/ru> (accessed 30.10.2023). (In Russ.)

13. Kavtarashvili A.Sh., Novotorov E.N., Gusev V.A., Gladin D.M. [The Productive Performance of Layers under LED Lighting with Variable Color Temperature]. *Ptitsvodstvo*. 2017;(3):27–29. (In Russ.) EDN: YLKCGV

14. Archer G.S. Color Temperature of Light-Emitting Diode Lighting Matters for Optimum Growth and Welfare of Broiler Chickens. *Animal*. 2018;12(5):1015–1021. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002361>
15. Dubrovsky A., Smirnova V. The Use of LED Lighting with Different Color Temperatures when Raising a Parent Flock of Poultry. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2020;(4):188–195. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF\\_files/vestnik\\_4\\_2020.pdf](https://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_4_2020.pdf) (accessed 30.10.2023).
16. Aldridge D.J., Scanes C.G., Kidd M.T. Performance and Preference of Broilers Provided Dual Light Warmth. *Journal of Applied Poultry Research*. 2021;30(4):100187. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100187>
17. Aldridge D.J., Owens C.M., Maynard C., Kidd M.T., Scanes C.G. Impact of Light Intensity or Choice of Intensity on Broiler Performance and Behavior. *Journal of Applied Poultry Research*. 2022;31(1):100216. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100216>
18. Gazalov V.S. Shabaev E.A., Romanovets M.M. [Modeling of Automatic Illumination Control System of Dynamic Lighting System with RGB-LED Lighting]. *AgroEcoInfo*. 2019;(2):14. (In Russ.) Available at: [https://agroeco.info.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st\\_223.doc](https://agroeco.info.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st_223.doc) (accessed 30.10.2023).
19. Mazurov V. [Automatic Regulators in Control Systems and Their Tuning. Part 3. Digital Controllers and Their Setting]. *Components & Technologies*. 2003;(6):146–151. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3AvWeU> (accessed 30.10.2023).
20. Anuchin A.S. Calculation Techniques for Parameters of a Digital PI Controller in an Electrical Drive. *Russian Electrical Engineering*. 2014;85:290–297. <https://doi.org/10.3103/S1068371214050022>
21. Åström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols Step Response Method for PID Control. *Journal of Process Control*. 2004;14(6):635–650. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.01.002>
22. Saravanakumar G., Dinesh S., Preteep S., Sridhar P., Suresh M. Controller Tuning Method for Non-Linear Conical Tank System. *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*. 2017;1(2):224–228. Available at: <https://ssrn.com/abstract=2942425> (accessed 30.10.2023).
23. Izosimova T.A., Mikhailova O.V., Maksimova M.V., Galynya A.V. Development of the Methodology for Determining Optimal Setting Parameters of Industrial Regulators. *Bulletin NGIE*. 2020;(3):5–20. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42593977> (accessed 30.10.2023).
24. Joseph S.B., Dada E.G., Abidemi A., Opeoluwa Oyewolaet D., Khammas B.M. Metaheuristic Algorithms for PID Controller Parameters Tuning: Review, Approaches and Open Problems. *Heliyon*. 2022;8(5):e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
25. Dogru O., Velswamy K., Ibrahim F., Wu Y., Sundaramoorthy A.S., Huang B., et al. Reinforcement Learning Approach to Autonomous PID Tuning. *Computers & Chemical Engineering*. 2022;161:107760. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107760>
26. Lolu S.J., Lolu G.D. Comparison of PID Tuning Methods for First Order Plus Time-Delay System. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2018;7(1):36–47. Available at: [https://ijarse.com/images/fullpdf/1515747909\\_J1006.pdf](https://ijarse.com/images/fullpdf/1515747909_J1006.pdf) (accessed 30.10.2023).
27. Demin I.O., Sablina G.V. Research of Methods for Setting Parameters of the PID Controller. *Automation & Software Engineering*. 2020;(1):174–181. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47420113> (accessed 30.10.2023).
28. Mazurov V. [Automatic Regulators in Control Systems and Their Tuning. Part 2. Automatic Regulators and Their Adjustment. General Information About Industrial Control Systems]. *Components & Technologies*. 2003;(5):114–118. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3AvfNy> (accessed 30.10.2023).
29. Denisenko V. [PID Controllers: Implementation Issues. Part 2]. *Sovremennaya Elektronika i Tekhnologii Avtomatizatsii*. 2008;(1):86–99. (In Russ.) Available at: <https://www.cta.ru/articles/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/125043/> (accessed 30.10.2023).
30. Shabaev E.A., Romanovets M.M., Kulachinskii V.A. The Research of the Heating of LEDs of a Compact Luminaire for a Local Lighting System. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15(1):78–86. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.55618/20756704\\_2022\\_15\\_1\\_78-86](https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_1_78-86)
31. Shabaev E.A., Romanovets M.M., Kulachinskiy V.A. Research of the Multichannel High-Voltage LED Driver. *Bulletin NGIEI*. 2023;(4):67–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-4-67-78>

*Об авторах:*

**Шабаев Евгений Адимович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, [sea007@rambler.ru](mailto:sea007@rambler.ru)

**Романовец Михаил Михайлович**, ассистент кафедры эксплуатации энергетического оборудования и электрических машин Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1945-1744>, [romanovetsm@yandex.ru](mailto:romanovetsm@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Е. А. Шабаев – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и выводов, разработка компьютерной модели, доработка текста.

М. М. Романовец – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов, разработка компьютерной модели, литературный анализ, формирование первоначального варианта текста

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Поступила в редакцию 30.11.2023; поступила после рецензирования 22.01.2024; принята к публикации 07.02.2024

*About the authors:*

**Evgeniy A. Shabaev**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of Chair of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, [sea007@rambler.ru](mailto:sea007@rambler.ru)

**Mikhail M. Romanovets**, Assistant of Chair of Operation of Power Installations and Electrical Machines, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1945-1744>, [romanovetsm@yandex.ru](mailto:romanovetsm@yandex.ru)

*Authors contribution:*

Е. А. Shabaev – scientific guidance, formulation of the main concept of the study, developing a computer model, formation of conclusions, revision of the text.

М. М. Romanovets – experimental research, processing experimental results, developing a computer model, carrying out literary analysis, preparing the initial version of the text.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

Submitted 30.11.2023; revised 22.01.2024; accepted 07.02.2024



## Обоснование параметров СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных

Г. В. Новикова<sup>1</sup>✉, А. А. Тихонов<sup>2</sup>, М. В. Просвирякова<sup>3</sup>,  
В. Ф. Сторчевой<sup>3</sup>, О. В. Михайлова<sup>1</sup>, А. В. Сторчевой<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
(г. Княгинино, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия  
(г. Нижний Новгород, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>4</sup> Российский биотехнологический университет  
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ [NovikovaGalinaV@yandex.ru](mailto:NovikovaGalinaV@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Существующие способы обезжиривания костей животных малоэффективны и требуют высоких эксплуатационных затрат. Для решения данной проблемы авторами настоящей статьи предлагается установка со сверхвысокочастотным энергоподводом в резонатор, где измельченное сырье подвергается термомеханическому воздействию. **Цель исследования.** Повышение эффективности извлечения жира из костей убойных животных с сохранением кормовой ценности продукта в СВЧ-установке непрерывно-поточного действия с коаксиальным резонатором без экранирующего корпуса путем обеспечения высокой напряженности электрического поля и термомеханического воздействия на сырье.

**Материалы и методы.** Трехмерное электромагнитное моделирование процессов распределения электромагнитного поля в коаксиальном резонаторе проводилось в системах проектирования CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE).

**Результаты исследования.** Сверхвысокочастотная установка содержит ферромагнитный усеченный конус, внутри которого соосно расположен электроприводной бичевой ротор с ферромагнитным валом, образующей коаксиальный резонатор с коническим кольцевым пространством. На валу ротора со сдвигом по высоте закреплены фторопластовые ступицы, к которым попарно с обеих сторон прикреплены корундовые била. С учетом исходных параметров измельченного костно-жирового сырья определена динамика нагрева при разных удельных мощностях СВЧ-генератора. **Обсуждение и заключение.** Результаты исследования электродинамических параметров резонатора свидетельствуют о том, что напряженность электрического поля, достаточная для снижения бактериальной обсемененности продукта, составляет 2–5 кВ/см.

© Новикова Г. В., Тихонов А. А., Просвирякова М. В.,  
Сторчевой В. Ф., Михайлова О. В., Сторчевой А. В., 2024



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

Эффективный режим обезжиривания костного сырья достигается при удельной мощности генератора 0,71 кВт/кг, продолжительности воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного поля 6,55 мин (при загрузке резонатора 9,3 кг), производительности 85 кг/ч, энергетических затратах 0,141 кВт·ч/кг и температуре нагрева 90–100 °С.

**Ключевые слова:** коаксиальный резонатор, бичевой ротор, фторопластовые ступицы, корундовое било, СВЧ-установка, обезжиривание, костное сырье

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Обоснование параметров СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных / Г. В. Новикова [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 318–335. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.318-335>

## Justification of the Microwave Unit Parameters for Removing Fat from the Bones of Meat-Producing Animals

G. V. Novikova<sup>a✉</sup>, A. A. Tikhonov<sup>b</sup>, M. V. Prosviryakova<sup>a</sup>,  
V. F. Storchevoy<sup>c</sup>, O. V. Mikhaylova<sup>c</sup>, A. V. Storchevoy<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University  
(Knyaginino, Russian Federation)

<sup>b</sup> Nizhny Novgorod State Agricultural Academy  
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)

<sup>c</sup> Russian Timiryazev State Agrarian University  
(Moscow, Russian Federation)

<sup>d</sup> Russian Biotechnological University  
(Moscow, Russian Federation)

✉ [NovikovaGalinaV@yandex.ru](mailto:NovikovaGalinaV@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** The existing methods of removing fat from the bones of meat-producing animals are low-efficient and require high operating costs. To solve this problem, a unit with an ultra-high-frequency energy supply to the resonator is proposed. In this unit the crushed raw materials are subjected to thermomechanical action.

**Aim of the Study.** The aim of the study is to increase the efficiency of removing fat from the bones of meat-producing animals while preserving the product feed value in a continuous-flow process microwave unit with a coaxial resonator without a shielding housing by providing a high electric field strength and thermomechanical effect on the raw materials.

**Materials and Methods.** Three-dimensional electromagnetic modeling of electromagnetic field distribution processes in a coaxial resonator was carried out in the CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) and Computer Aided Engineering (CAE).

**Results.** The ultrahigh frequency unit contains a non-ferromagnetic truncated cone, inside which an electrically driven whip rotor with a non-ferromagnetic shaft is coaxially located, forming a coaxial resonator with a conical annular space. Fluoroplastic hubs are fixed to the rotor shaft with a height shift, to which corundum bilas are attached in pairs on both sides. A shell of a truncated cone coated with an abrasive material is coaxially attached to the inner shell of a non-ferromagnetic truncated cone. The dynamics of heating at different specific capacities of the microwave generator is determined taking into account the initial parameters of the crushed bone and fat raw materials.

**Discussion and Conclusion.** The results of studying the electrodynamic parameters of the resonator indicate that the electric field strength 2–5 kV/cm is sufficient to reduce bacterial contamination of the product. An effective mode for removing fat from bone raw



materials is when the generator specific power is 0.71 kW/kg, duration of exposure to an ultrahigh frequency electromagnetic field is 6.55 min (when loading the resonator 9.3 kg), productivity is 85 kg/h, energy consumption of is 0.141 kWh/kg and heating temperature is 90–100 °C.

**Keywords:** coaxial resonator, whip rotor, fluoroplastic hubs, corundum bilo, microwave installation, degreasing, bone raw materials

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

**For citation:** Novikova G.V., Tikhonov A.A., Prosviryakova M.V., Storchevoy V.F., Mikhaylova O.V., Storchevoy A.V. Justification of the Microwave Unit Parameters for Removing Fat from the Bones of Meat-Producing Animals. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):318–335. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.318-335>

**Введение.** Согласно данным Росстата<sup>1</sup>, в 2022 г. объем произведенной в России мясокостной муки составляет 564 тыс. т. В этой связи увеличилась и потребность в технологиях вытопки жира из костного сырья. В принятой практике пищевую кость обезжиривают сухим или мокрым способом при температуре до 100 °C. Качество жира зависит от максимальной температуры и продолжительности термообработки. Применение температуры выше 120 °C отрицательно сказывается на свойствах жира [1–3]. Наименьшая продолжительность обработки определяется временем плавления жира и выдержки сырья для уничтожения патогенной микрофлоры. Известно, что удельная теплота, необходимая для обработки жирсырья, не зависит от способа подвода энергии, а продолжительность обработки определяется видом подвода энергии, интенсивностью переноса теплоты и массы, площадью поверхности сырья и его электрофизическими свойствами. Для технологического процесса вытопки жира из костей убойных животных и получения костного остатка для выработки желатина или производства белкового корма используются установки с различными способами энергоподвода [4–6]. Ряд авторов<sup>2</sup> [7; 8] отмечают, что объемы производства белкового корма из костного сырья достаточно низкие, и предлагают варианты расширения сферы применения костного сырья. Также они описывают основные виды аппаратов и технологий переработки костного сырья для приготовления разных продуктов.

Цель исследования – повысить эффективность извлечения жира из костей убойных животных с сохранением кормовой ценности продукта в сверхвысокочастотной установке непрерывно-поточного действия с коаксиальным резонатором без экранирующего корпуса с помощью высокой напряженности электрического поля и термомеханического воздействия на сырье. При этом решаются такие задачи, как анализ оборудования для термомеханической обработки костей животных, разработка рабочей камеры с магнетронами воздушного охлаждения, определение продолжительности сверхвысокочастотного воздействия и режимов работы установки.

<sup>1</sup> Аналитический обзор рынка кормовых добавок [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/39yftQ> (дата обращения: 01.08.2023).

<sup>2</sup> Мухаметова А. Э., Ямалетдинова К. Ш. Комплексное использование костной массы как метод повышения эффективности мясоперерабатывающего предприятия // Инновации и наукоемкие технологии в образовании и экономике : мат-лы X Междунар. науч.-практ. и метод. конф. Уфа : Башкирский государственный университет, 2022. С. 35–37.

**Обзор литературы.** В настоящее время известны гидромеханические и электроимпульсные способы извлечения жира из костей. Обезжиривание предварительно измельченных костей в смеси с водой в гидромеханической машине основано на принципе ударно-импульсного разрушения жировых клеток. Импульсы возникают при движении бил, вращающихся на электроприводном валу в корпусе машины. При ударе смеси о турбулизатор создаются гидромеханические эффекты, обеспечивающие выделение жира. Далее смесь жира, воды и костей под действием центробежной силы выбрасывается в разделитель, где жир всплывает, откуда его направляют в плавильный аппарат<sup>3</sup>.

К недостаткам такого метода необходимо отнести значительный расход воды, большое количество задействованных аппаратов (в том числе гидромеханической машины высокой производительности), а также то, что энергоэффективность самой установки не отвечает требованиям фермерских хозяйств (достаточно иметь установку до 200 кг/ч).

В электроимпульсных аппаратах нет электроприводных узлов. Для обезжиривания костей создают динамические импульсы в жидкости с помощью электрического пробоя между двумя электродами при разряде конденсаторов. При этом импульсная кавитация способствует разрушению оболочек жировых клеток и последующему вымыванию жира. После пропускания через зону разряда кость обезжиривается, а затем выгружается. Жир после отстаивания в аппарате выводится через гидрозатвор. Энергетические затраты достаточно низкие, однако аппарат работает при напряжении на электродах 30–60 кВ, а корпус заполнен водой. Пробивное напряжение воздуха – 30 кВ, поэтому требуется строгое соблюдение электробезопасности, что в условиях фермерских хозяйств выполняется не всегда.

В научной школе разработаны десятки СВЧ-установок для термообработки вторичного сырья животного происхождения [9–12]. Например, модульная СВЧ-установка непрерывно-поточного действия для термообработки и обеззараживания сырья животного происхождения [13] содержит съемные объемные резонаторы в виде трех модулей. Первый модуль предназначен для термообработки вторичного биологического сырья животного происхождения, включая замороженные блоки мясных отходов, но не может быть использован для извлечения жира из костей.

Известна СВЧ-установка с коническим резонатором для обезвоживания и термообработки мясных отходов (непищевая обрезь, субпродукты, кровь) [14]. Установка содержит конический экранирующий корпус с ситовым резонатором в виде усеченного конуса без оснований, внутри которого находится диэлектрический ротор в виде усеченного конуса, покрытый мелкозернистым абразивным материалом. Установка обеспечивает совмещение процессов обезвоживания измельченных мясных отходов, тонкого измельчения и термообработки сырья твердой фазы. Данная установка также не рассчитана на извлечение жира из костей.

<sup>3</sup> Ивашов В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. Ч. 1. Оборудование для уоя и первичной обработки. М. : Колос, 2001. 552 с.

Существует СВЧ-установка с биконическим резонатором и пакетом тарелок для термообработки мясокостных конфискатов [15; 16]. Внутренний пакет фторопластовых тарелок установлен на электроприводной диэлектрический вал со спиральным диэлектрическим шнеком в нижней конической обечайке. Верхняя обечайка перфорирована и соосно расположена в экранирующем усеченном конусе. Использование данной установки позволит повысить качество обработки мясокостного сырья. Недостатком является сложная для санитарной обработки в условиях фермерских хозяйств конструкция.

Обзор существующих технологий и оборудования показал, что учеными не в полной мере решен вопрос вытопки жира из костей. Эффективность процесса вытопки зависит от способа подвода тепла, температуры нагрева сырья (не более 120 °С), величины измельченных частиц, согласованной с глубиной проникновения волны при диэлектрическом нагреве.

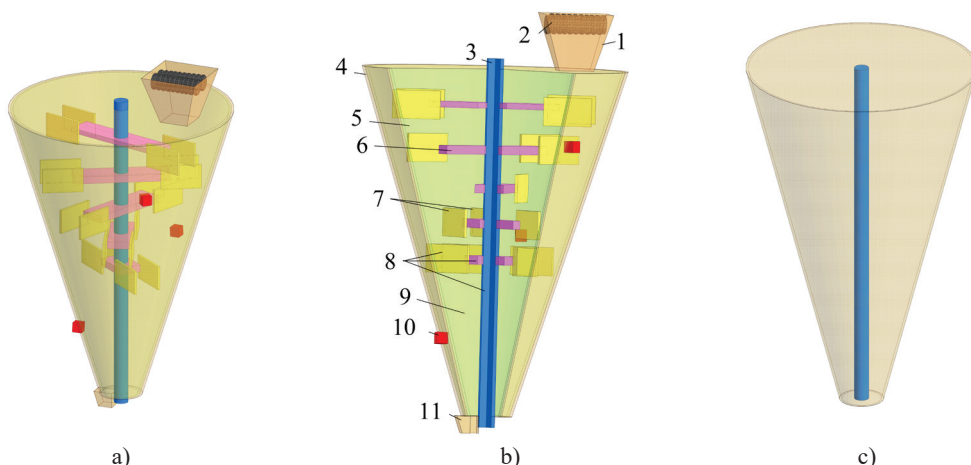
Таким образом, научная проблема заключается в низкой эффективности аппаратов для извлечения жира из костей убойных животных. Для интенсификации теплообмена авторами настоящей статьи предлагается установка СВЧ-энергоподвода в резонатор, где предварительно измельченное сырье будет подвергаться термомеханическому воздействию.

**Материалы и методы.** Трехмерное моделирование электродинамических процессов распределения электромагнитных полей в резонаторе нестандартной конструкции и определение рациональных электродинамических параметров проводили с использованием систем проектирования Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE) [17–19].

Для проектирования, численного моделирования и оптимизации трехмерных электромагнитных систем использовали также пакет инструментов CST Microwave Studio Suite. Имеются разные программы [20; 21], содержащие базу данных волноводов и объемных резонаторов, из которых можно выбрать подходящие параметризованные модели и экспортировать данные в указанный пакет инструментов для выполнения моделирования и оптимизации. Частоту вращения бичевого ротора для тонкого измельчения костного сырья принимали по данным В. И. Ивашова. Она равна 200–250 об/мин.

**Результаты исследования.** На рисунке 1 показана СВЧ-установка непрерывно-поточного действия для извлечения жира из костей убойных животных, содержащая вертикально расположенный неферромагнитный усеченный конус 4 с загрузочной I и приемной II емкостями. Внутри загрузочной неферромагнитной емкости I расположен шредер 2. В усеченном конусе соосно расположен электроприводной бичевой ротор 8. Неферромагнитный вал 3 и неферромагнитный усеченный конус образуют коаксиальный резонатор 9. На наружной поверхности коаксиального резонатора со сдвигом на 120 °С по периметру установлены по высоте магнетроны 10 воздушного охлаждения с волноводами. На неферромагнитный валу бичевого ротора с помощью шпонок закреплены фторопластовые ступицы 6, к которым на пальцах попарно с двух противоположных сторон прикреплены четыре корундовых била 7. Каждая следующая пара бил смещена на 30 °С, что создает эффект винтовой линии. К внутренней обечайке неферромагнитного усеченного

конуса прикреплен диэлектрический усеченный конус 5, покрытый абразивным материалом. Между внешней кромкой бил 7 бичевого ротора 8 и внутренней поверхностью диэлектрического усеченного конуса образован зазор 2–3 см.



Р и с. 1. Цифровая модель СВЧ-установки для извлечения жира из костей убойных животных:

- а) общий вид; б) общий вид в разрезе с позициями;  
 в) коаксиальный резонатор с коническим кольцевым пространством;  
 1 – загрузочная емкость; 2 – шредер; 3 – неферромагнитный вал бичевого ротора;  
 4 – неферромагнитный усеченный конус; 5 – диэлектрический усеченный конус;  
 6 – ступицы фторопластовые; 7 – билы из корунда; 8 – бичевой ротор;  
 9 – коаксиальный резонатор; 10 – магнетроны с волноводами; 11 – приемная емкость

F i g. 1. Digital model of the microwave installation for extracting fat from the bones of slaughtered animals: а) general view; б) general view in section with positions;

- в) coaxial resonator with conical annular space;  
 1 – loading tank; 2 – shredder; 3 – non-ferromagnetic shaft of the scourge rotor;  
 4 – non-ferromagnetic truncated cone; 5 – dielectric truncated cone; 6 – fluoroplastic hubs;  
 7 – corundum bilas; 8 – whip rotor; 9 – coaxial resonator; 10 – magnetrons with waveguides;  
 11 – receiving capacity

*Источник:* здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

*Source:* Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

Технологический процесс извлечения жира из костей убойных животных происходит следующим образом. Сначала необходимо включить электропривод бичевого ротора и электропривод шредера. Далее кости убойных животных загружают в емкость. Измельченные с помощью шредера кости животных поступают через загрузочную емкость в коаксиальный резонатор и попадают под вращающиеся билы (200–250 об/мин). После включения магнетронов в коаксиальном резонаторе возбуждается ЭМП СВЧ – электромагнитное поле сверхвысокой частоты (длина волны равна 12,24 см), измельченное жиросодержащее сырье подвергается эндотенному нагреву под действием токов поляризации.

Так как к внутренней обечайке усеченного неферромагнитного конуса прикреплена обечайка диэлектрического усеченного конуса, покрытая абразивным материалом, под действием центробежных сил сырье распределяется по стенкам

диэлектрического усеченного конуса, ударяясь об абразивное покрытие. В зазоре между внешними кромками бил и диэлектрическим усеченным конусом сырье движется вместе с билами вниз, так как они расположены со сдвигом на 30 °С по высоте рабочей камеры.

За счет многократного удара бичевым ротором в процессе эндогенного нагрева разрушается пограничный слой на поверхности измельченного сырья, ускоряя тем самым процесс массопереноса (повышается степень извлечения жира). При этом создаются термомеханические эффекты, обеспечивающие выделение жира из измельченных частиц сырья. Расположение бил по конической линии обеспечивает продольное смещение смеси. Сырье под действием центробежных сил вращающегося бичевого ротора отбрасывается к абразивной поверхности диэлектрического усеченного конуса. Происходит завихрение измельченных частиц костно-жирового сырья (турбулизация сырья).

Оно подвергается многократному механическому удару. Продолжительность процесса обезжиривания сырья в ЭМПСВЧ составляет 5–7 мин (в зависимости от удельной мощности генератора), после чего под действием центробежных сил смесь жира и частиц костей выбрасывается через отверстие в малом основании усеченного конуса в приемную неферромагнитную емкость *II* с заслонкой. Заполненную емкость следует передвинуть. В ней жир всплывает на поверхность, а кости оседают на дно. Большая скорость бичевого ротора и высокая напряженность электрического поля обеспечивают повышение интенсивности обезжиривания тонкоизмельченного сырья. Технологический эффект существенно зависит от частоты вращения бичевого ротора, зазора между бичами и абразивной поверхностью усеченного диэлектрического конуса, количества гонок (корундовых бил с диэлектрическими ступицами). Бичевой ротор выполняет функцию ударного и транспортирующего воздействия на сырье. Для обеспечения механического воздействия и дифференцированной скорости транспортирования сырья по высоте резонатора гонки установлены под различными углами к оси вала.

Характерной особенностью конического резонатора является наличие в резонансном объеме областей с резко выраженным экспоненциальным законом изменения электромагнитного поля. Наличие областей с таким распределением поля позволяет удалить часть поверхности с сохранением высокой собственной добротности резонатора для некоторых типов колебаний и тем самым реализовать открытую резонансную систему для функционирования СВЧ-установки в непрерывно-поточном режиме с соблюдением электромагнитной безопасности [22].

При плавлении жира происходят изменения его диэлектрических и теплофизических характеристик, что влияет на продолжительность диэлектрического нагрева до полного обезжиривания костного сырья.

С учетом удельной теплоемкости расплавленного жира 2300 Дж/кг·°С, фактора диэлектрических потерь при температуре 80–100 °С и ожидаемой напряженности электрического поля в коаксиальном резонаторе 5 кВ/см предварительно вычислена продолжительность воздействия ЭМПСВЧ на сырье.

Из выражения, характеризующего скорость нагрева жира ( $\Delta T/\Delta\tau$ , °C/с), продолжительность воздействия ЭМП СВЧ<sup>4</sup> определяется по формуле:

$$\frac{\Delta T}{\Delta\tau} = \frac{0,555 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2 \left(\frac{В}{см}\right)^2 \cdot \eta \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot c}, \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота электромагнитного поля, МГц;  $k$  – фактор диэлектрических потерь;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\eta$  – термический коэффициент полезного действия;  $\rho$  – плотность расплавленного жира, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость расплавленного жира, Дж/кг·°C.

Продолжительность воздействия ЭМП СВЧ рассчитаем следующим образом:

$$\Delta\tau = \frac{90 \cdot 930 \cdot 2300}{0,555 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 5000^2 \cdot 0,72} = 393 \text{ с} = 6,55 \text{ мин.} \quad (2)$$

Расчеты показывают, что при напряженности электрического поля, равной 5 кВ/см, продолжительность воздействия ЭМП СВЧ составляет 6,55 мин (0,109 ч), если термический КПД составляет 0,72–0,75.

В конструкционном исполнении установки необходимо реализовать технологическую задачу разрушения жировых клеток и выделения жира за период термомеханической обработки сырья. Для равномерного нагрева измельченного костного сырья в электромагнитном поле бегущей волны предусмотрена турбулизация частиц костно-жирового сырья под действием центробежных сил вращающегося бичевого ротора. Вычисленную продолжительность термомеханической обработки сырья следует корректировать с учетом требований технологии и результатов экспериментальных исследований.

Расчет конструктивных параметров открытого коаксиального резонатора проводился с учетом длины волны 12,24 см [23–25], уменьшения глубины проникновения волны в костное сырье при обезжиривании до 11,2–1,7 см<sup>5</sup> [26–28], известных методик расчетов резонаторов сантиметрового диапазона [29–31].

Для обоснования эффективной конструкции резонатора были проведены теоретические расчеты с использованием известных математических выражений, а также компьютерное моделирование электродинамических процессов в коаксиальном резонаторе с коническим кольцевым пространством в программе CST Microwave Studio. Так, предварительно рассчитана собственная добротность резонатора при размерах усеченного конуса, согласованных с длиной волны 12,24 см. Высота равна 122,4 см; диаметр большого основания – 61,2 см; диаметр малого основания – 9 см. Собственная добротность вычислена через объем ( $V$ , м<sup>3</sup>) и площадь поверхности стенок алюминиевого резонатора ( $S$ , м<sup>2</sup>) с учетом толщины

<sup>4</sup> Стрекалов А. В., Стрекалов Ю. А. Электромагнитные поля и волны : Учеб. пособие. М. : РИОР: ИНФРА-М, 2014. 375 с.

<sup>5</sup> Рогов И. А. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.



скин-слоя ( $\Delta = 1,72$  мкм) при частоте  $2\,450$  МГц<sup>6</sup>. Объем и площадь поверхности коаксиального резонатора вычислены по нижеприведенным формулам:

$$V_{\text{конус}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 30,6^2 \cdot 122,4 = 119\,959 \text{ см}^3; \quad (3)$$

$$S_{\text{кон.}} = \pi \cdot R \cdot (R + L) = 3,14 \cdot 30,6 \cdot (30,6 + 126,17) = 15\,063 \text{ см}^2; \quad (4)$$

$$V_{\text{конус}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 4,5^2 \cdot 18 = 381,5 \text{ см}^3; \quad (5)$$

$$S_{\text{усеч. кон.}} = \pi \cdot r \cdot (r + l) = 3,14 \cdot 4,5 \cdot (4,5 + 7,6) = 171 \text{ см}^2; \quad (6)$$

$$V_{\text{усеч. кон.}} = 119\,959 - 381,5 = 119\,577,5 \text{ см}^3; \quad (7)$$

$$S_{\text{усеч. кон.}} = 15\,063 - 171 = 14\,892 \text{ см}^2, \quad (8)$$

где  $R$ ,  $L$ ,  $H$  и  $r$ ,  $l$ ,  $h$  – параметры конструкции: конуса и усеченной части конуса соответственно.

С учетом объема  $3\,599 \text{ см}^3$  и площади  $1\,176 \text{ см}^2$  поверхности неферромагнитного вала диаметром  $3,06$  см объем и площадь поверхности коаксиального резонатора с коническим кольцевым объемом составляет:

$$\begin{aligned} V_{\text{резон.}} &= 119\,577,5 - 3\,599 = 115\,979 \text{ см}^3; \\ S_{\text{резон.}} &= 14\,892 - 1\,176 = 13\,716 \text{ см}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Собственная добротность коаксиального резонатора вычисляется по формуле:

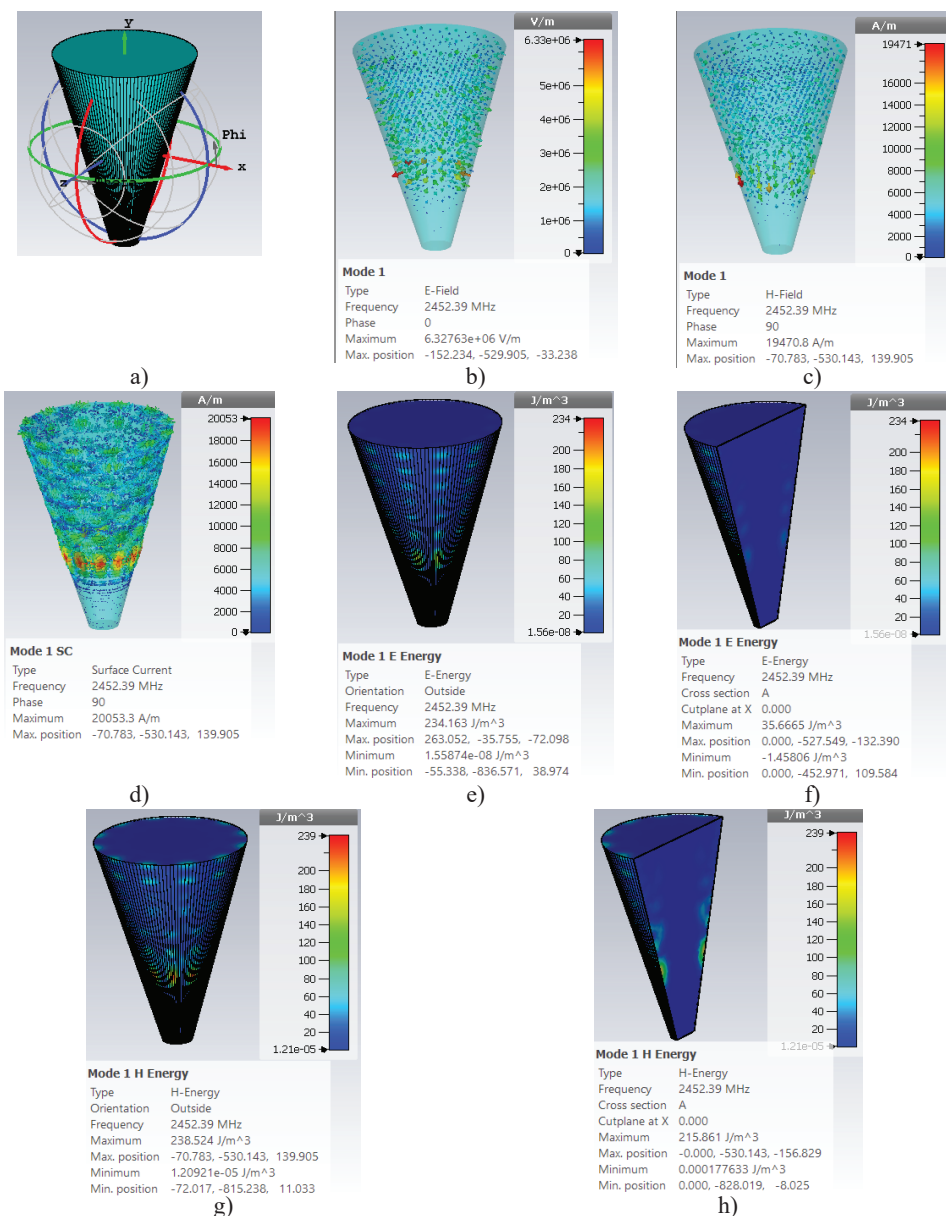
$$Q = \frac{2 \cdot V}{S \cdot \Delta} = \frac{2 \cdot 0,115979}{1,3716 \cdot 1,72 \cdot 10^{-6}} = 98\,322. \quad (10)$$

Расчеты показывают, что собственная добротность коаксиального резонатора равна  $98\,322$ , следовательно, термический КПД может составить  $0,72\text{--}0,75$ .

Результаты компьютерного моделирования электродинамических (ЭД) процессов в коаксиальном резонаторе с коническим кольцевым объемом (вышеуказанными задаваемыми параметрами конструкции) в программе CST Microwave Studio приведены на рисунке 2. Они свидетельствуют о том, что конические резонаторы исключают вырождение паразитных типов колебаний, а это позволяет достичь высоких значений собственной добротности.

Результаты моделирования распространения микроволнового поля для коаксиального резонатора с коническим кольцевым объемом  $115\,979 \text{ см}^3$  (рис. 2), выполненного в программном комплексе электродинамического моделирования CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE), позволили получить распределение ЭМП по координатным осям, вычислить напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, поверхностный ток, энергию электрического и магнитного полей.

<sup>6</sup> Пчельников Ю. Н., Свиридов В. Т. Электроника сверхвысоких частот. М. : Радио и связь, 1981. 96 с.



Р и с. 2. Результаты компьютерного моделирования электродинамических параметров коаксиального резонатора с кольцевым коническим объемом (мода 1) в системах проектирования CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) и Computer Aided Engineering (CAE): а) распределение ЭМП по координатам  $x, y, z$ ; б) напряженность электрического поля, В/м; с) напряженность магнитного поля, А/м; д) поверхностный ток, А/м; е) Е-энергия, Вт/м<sup>3</sup>; ф) Е-энергия в разрезе, Вт/м<sup>3</sup>; г) H-энергия, Вт/м<sup>3</sup>; г) H-энергия, Вт/м<sup>3</sup>; h) H-энергия в разрезе, Вт/м<sup>3</sup>

F i g. 2. Electrodynamic parameters of a coaxial resonator with an annular conic space (mode 1) in the system CST Microwave Studio, Computer Aided Design (CAD) and Computer Aided Engineering (CAE): а) EMF distribution by  $x, y, z$  coordinates; б) electric field strength, В/м; с) magnetic field strength, А/м; д) surface current; е) E-energy, W/m<sup>3</sup>; ф) E-energy in section, W/m<sup>3</sup>; г) H-energy, W/m<sup>3</sup>; г) H-energy, W/m<sup>3</sup>; h) H-energy in section, W/m<sup>3</sup>

Для обеспечения непрерывного режима работы установки конический корпус усечен и представлен как открытый резонатор. С изменением угла при вершине конуса сформировано электромагнитное поле, сконцентрированное в основном в центральной области коаксиального резонатора, что способствует повышению собственной добротности резонатора с коническим кольцевым пространством. В средней части такого резонатора существуют волны, постоянные распространения которых уменьшаются в случае удаления от центра резонатора (рис. 4). Напряженность электрического поля в резонаторе находится в пределах 5 кВ/см, что позволяет уменьшить общее микробное число в продукте до предельно допустимого уровня 500 тыс. КОЕ/г. Ю. В. Корчагин и соавторы [32] доказали, что увеличение напряженности электрического поля, возбужденного маломощным источником СВЧ-излучения, выше 1,2 кВ/см обеспечивает уничтожение микроорганизмов.

Анализ электродинамики процессов СВЧ-термообработки костного сырья и результаты компьютерного моделирования электромагнитных волн подтверждают достоверность результатов теоретических исследований. В перспективе планируется создать СВЧ-установку с коаксиальным резонатором с кольцевым коническим пространством и уточнить результаты моделирования.

Поиск эффективных режимов работы СВЧ-установки сводится к выявлению условий, обеспечивающих интенсивное обезжиривание сырья при дозе воздействия ЭМП СВЧ 77–78 Вт·ч/кг ( $6,6 \text{ кВт} \cdot 0,109 \text{ ч} / 9,3 \text{ кг} = 77,35 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ ).

Так, эффективный режим обезжиривания достигается при удельной мощности генератора 0,71 кВт/кг; продолжительности воздействия ЭМП СВЧ 6,55 мин (при загрузке резонатора 9,3 кг); производительности 85 кг/ч; энергетических затратах 0,141 кВт·ч/кг; температуре нагрева 90–100 °С.

Технические характеристики СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

**Технические характеристики СВЧ-установки для обезжиривания костей убойных животных**  
**Technical characteristics of a microwave unit for degreasing the bones of slaughtered animals**

Наименование / Name	Параметры / Parameters
1	2
Количество СВЧ-генераторов, шт. / Number of microwave generators, pcs.	6,000
Производительность, кг/ч / Capacity, kg/h	85,000
Масса единовременной загрузки сырья, кг / Mass of one-time loading of raw materials, kg	9,300
Мощность шести магнетронов, кВт / Power of six magnetrons, kW	6,600
Мощность шести вентиляторов для охлаждения магнетронов, кВт (вентилятор осевой канальный CV-150, 30 Вт) / Power of six fans for cooling magnetrons, kW (axial channel fan CV-150, 30 W)	0,180
Мощность бичевого ротора, кВт / The power of the whip rotor, kW	4,000
Частота вращения бичевого ротора, об/мин / The frequency of rotation of the whip rotor, rpm	200,000
Мощность шредера, кВт / Shredder power, kW	1,220

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2
Потребляемая мощность СВЧ-установки, кВт / Power consumption of the microwave unit, kW	12,000
Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг / Specific energy costs, kW·h/kg	0,141
Планируемая балансовая стоимость, тыс. руб. / Planned book value, thousand rubles	200,000

*Источник:* составлено авторами.

*Source:* Complited by the authors.

За счет неферромагнитного шредера в загрузочной емкости и усечения конуса на уровне критического сечения (диаметр малого основания равен 9 см), когда ЭМП отражается внутрь резонатора (рис. 4), при непрерывном режиме работы установки ожидается обеспечение электромагнитной безопасности на предельно допустимом уровне (допустимая мощность потока излучений равна 10 мкВт/см<sup>2</sup>) [32].

**Обсуждение и заключение.** Разработанная технология термомеханического метода извлечения жира из измельченного костно-жирового сырья и конструктивное исполнение СВЧ-установки с коаксиальным резонатором с кольцевым коническим объемом и бичевым ротором могут быть использованы для вытопки жира из костей убойных животных в фермерских хозяйствах.

Сочетание воздействия ЭМП СВЧ и многократного удара предварительно измельченного сырья с помощью диэлектрического бичевого ротора об абразивную поверхность при передвижении через коаксиальный резонатор в турбулентном режиме ускоряет процесс обезжиривания сырья при непрерывном режиме работы установки с соблюдением электромагнитной безопасности.

Результаты вычисления и визуализации распределения электромагнитного поля в режиме переходного процесса в коаксиальном резонаторе с кольцевым коническим объемом позволили комплексно оценить основные параметры электродинамической системы (собственную добротность, напряженность электрического поля, поверхностный ток, E-энергию и др.).

Результаты исследования показывают, что СВЧ-установка с шестью магнетронами воздушного охлаждения мощностью по 1,1 кВт при измельчении костно-жирового сырья убойных животных может обеспечить термомеханическое воздействие на сырье производительностью 85 кг/ч в непрерывном режиме при высокой напряженности электрического поля 5 кВ/см.

Для обеспечения необходимой технологической эффективности процесса обезжиривания сырья следует поддерживать следующий режим работы установки: напряженность электрического поля равна 2–5 кВ/см; удельная мощность генератора равна 0,71 кВт/кг; продолжительность воздействия ЭМП СВЧ равна 6,55 мин (при загрузке резонатора 9,3 кг); производительность равна 85 кг/ч; энергетические затраты равны 0,141 кВт·ч/кг; температура нагрева равна 90–100 °С.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Файвишевский М. Л. Совершенствование переработки некоторых видов побочного мясного сырья // Мясные технологии. 2022. № 5 (233). С. 44–47. EDN: UQVXFX
2. Файвишевский М. Л. О переработке и использовании кости убойных животных на пищевые цели // Мясные технологии. 2023. № 10 (250). С. 56–57. EDN: UZJKMS
3. Файвишевский М. Л. Новые решения по переработке и использованию некоторых видов специального побочного мясного сырья // Мясные технологии. 2021. № 11 (227). С. 40–43. EDN: TGHFEU
4. Файвишевский М. Л. Некоторые виды оборудования многопрофильного назначения // Мясные технологии. 2020. № 9 (213). С. 68–71. EDN: GWQKEB
5. Файвишевский М. Л. Некоторые предложения по совершенствованию переработки и использованию животного сырья // Мясные технологии. 2023. № 7 (247). С. 40–41. EDN: ZPZPGT
6. Файвишевский М. Л. К вопросу о бережливом производстве на мясокомбинатах // Мясные технологии. 2021. № 5 (221). С. 24–27. EDN: FSXEAP
7. Киселева И. С., Рудик Ф. Я., Романова О. В. Ресурсосберегающие технологии переработки мясной продукции // Аграрный научный журнал. 2023. № 5. С. 140–145. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i5pp140-145>
8. Сверхвысокочастотная установка с коаксиально расположенными резонаторами для термообработки и стерилизации измельченного мясного сырья в непрерывном режиме : патент № 2716084 Российская Федерация / Осокин В. Л. [и др.]. № 2019129666 ; заявл. 19.09.2019 ; опубл. 05.03.2020, Бюл. № 7. 9 с.
9. Разработка и обоснование параметров установки с СВЧ-энергоподводом в биконической резонатор для термообработки мясного сырья / Г. В. Новикова [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5 (103). С.154–160. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-103-5-154-160>
10. Анализ разработанных сверхвысокочастотных установок для термообработки сырья / Г. В. Новикова [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11, № 4 (42). С. 89–93. URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/15648/view> (дата обращения: 01.08.2023).
11. Microwave Heating of Slaughterhouse Confiscations to Increase the Feed Value / O. V. Mikhailova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Issue 857. Article no. 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/857/1/012002>
12. Survey on UHF Device Operating Modes for Thermal Treatment and Disinfection of Nonfood Animal-Origin Raw Materials / G. V. Zhdankin [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2020. Vol. 46, Issue 1. P. 94–99. <https://doi.org/10.3103/S1068367420010206>
13. Перспективы использования вторичных ресурсов мясоперерабатывающих отраслей на основе патентных исследований / В. А. Углов [и др.] // Инновации и продовольственная безопасность. 2020. № 3 (29). С. 39–46. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-39-46>
14. Сверхвысокочастотная установка с коническим резонатором для обезвоживания и термообработки мясных отходов : патент № 2710154 Российская Федерация / Казаков А. В. [и др.]. № 2019118371 ; заявл. 13.06.2019 ; опубл. 24.12.2019, Бюл. № 36. 10 с.
15. Воронов Е. В. Исследование и обоснование параметров СВЧ-установки, реализующей ресурсосберегающую технологию термообработки мясных отходов // Вестник НГИЭИ. 2023. № 8 (147). С. 33–43. URL: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=2269](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2269) (дата обращения: 01.08.2023).
16. СВЧ-установка с биконическим резонатором и пакетами тарелок для термообработки мясокостных конфискатов : патент № 2803127 Российская Федерация / Новикова Г. В. [и др.]. № 2023115058 ; заявл. 08.06.2023 ; опубл. 06.09.2023, Бюл. № 25. 22 с.
17. Алексейчик Л. В., Курушин А. А. Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 11. С. 1–16. EDN: XYFOXB

18. Бабак Л. И., Коколов А. А. Создание отечественной платформы САПР для проектирования СВЧ-устройств и полупроводниковых ИС // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № 54 (99). С. 377–378. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.377.378>
19. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств / Д. Г. Фомин [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5, № 2. С. 91–103. <https://doi.org/10.15826/urej.2021.5.2.001>
20. Татаркин Н. М., Зайцева Е. М., Шишаков К. В. Разработка волноводно-щелевых антенных решеток через взаимодополнение программ CST Microwave Studio и КОМПАС-3D // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 69–80. <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-2-69-80>
21. Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот / Е. В. Титов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 3 (209). С. 102–108. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209-3-102-108>
22. Касимова А. У. Сравнительный анализ численных методов моделирования микрополосковой антенны // Проблемы автоматизации и управления. 2022. № 3 (45). С. 31–41. EDN: OCFQUY
23. Каткова Т. О., Седышев Э. Ю. Генератор СВЧ на кольцевом эллиптическом резонаторе в объемном интегральном исполнении // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. Т. 1. С. 430–433. EDN: SWJDTM
24. Исследование объемного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором / Д. Г. Фомин [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. 2020. Т. 4, № 3. С. 277–292. <https://doi.org/10.15826/urej.2020.4.3.002>
25. Давидович М. В., Кобец А. К., Саяпин К. А. Возбуждение прямоугольного резонатора через окна связи в конвейерной установке СВЧ-нагрева // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 4. С. 88–99. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.88-99>
26. Тухватуллин М. И. Обеспечение равномерной микроволновой обработки биологических субстратов в СВЧ электротехнологической установке // Российский электронный научный журнал. 2022. № 4 (46). С. 22–32. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2022-46-4-22-32>
27. Тухватуллин М. И. Конструкции гибридной СВЧ электротехнологической установки для обработки материалов в сельском хозяйстве // Российский электронный научный журнал. 2023. № 3 (49). С. 20–33. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2023-49-3-20-33>
28. Захаров В. В., Тригорлый С. В. Численные и экспериментальные исследования процессов СВЧ термообработки диэлектриков в СВЧ камерах бегущей волны // Вопросы электротехнологии. 2020. № 1 (26). С. 14–22. EDN: VKMMXS
29. Смирнов С. В., Морозов Г. А., Морозов О. Г. Разработка метода контроля параметров процесса микроволновой переработки отходов животноводства // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 11 (101). С. 67–73. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.101.11.010>
30. Вендин С. В. ЭМП СВЧ для обработки сырья в АПК // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2020. № 9. С. 38–41. EDN: FACCAV
31. Совместное использование ультразвуковой обработки и электрического поля СВЧ при дефростации мясного сырья / И. Ф. Горлов [и др.] // Аграрно-пищевые инновации. 2022. № 4 (20). С. 73–81. <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2022-20-73-81>
32. Титов Е. В., Крюков А. В., Середкин Д. А. Сравнительный анализ подходов к нормированию электромагнитного поля в производственных условиях в соответствии с российскими и европейскими нормативными документами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 10 (216). С. 81–89. URL: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/1171> (дата обращения: 01.08.2023).

*Об авторах:*

**Новикова Галина Владимировна**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, Researcher ID: ADR-0209-2022, [NovikovaGalinaV@yandex.ru](mailto:NovikovaGalinaV@yandex.ru)



**Тихонов Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного аграрно-технологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3687-977X>, [tichonov57@mail.ru](mailto:tichonov57@mail.ru)

**Просвирякова Марьяна Валентиновна**, доктор технических наук, доцент, профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация) (127550, Российская Федерация, г. Москва, Лиственничная аллея, д. 6, к. 24), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>, Researcher ID: AAQ-1331-2021, [prosviryakova.maryana@yandex.ru](mailto:prosviryakova.maryana@yandex.ru)

**Сторчевой Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127550, Российская Федерация, г. Москва, Лиственничная аллея, д. 6, к. 24), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, Researcher ID: ABB-9545-2021, [vstorchevoy@mail.ru](mailto:vstorchevoy@mail.ru)

**Михайлова Ольга Валентиновна**, доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9231-4733>, Researcher ID: GXV-1750-2022, [ds17823@yandex.ru](mailto:ds17823@yandex.ru)

**Сторчевой Александр Владимирович**, старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных дисциплин Российского биотехнологического университета (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, [alecks.10@mail.ru](mailto:alecks.10@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Г. В. Новикова – научное руководство, сравнительный анализ конструкций, формулировка выводов.

А. А. Тихонов – расчет продолжительности термомеханической обработки сырья.

М. В. Просвирякова – анализ существующих аппаратов для термообработки жиросодержащего костного сырья.

В. Ф. Сторчевой – определение эффективной конструкции резонатора для обезжиривания костного сырья.

О. В. Михайлова – построение 3D-модели установок, моделирование трехмерных структур электромагнитного поля в объемном резонаторе.

А. В. Сторчевой – верстка и форматирование работы, сбор и обработка материалов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 11.09.2023; поступила после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 10.12.2023*

## REFERENCES

1. Fayvishevsky M.L. [Improvement of Processing of Some Types of By-Product Meat Raw Materials]. *Meat Technology*. 2022;(5):44–47. (In Russ.) EDN: UQVXFX
2. Fayvishevsky M.L. [On the Processing and use of Bones of Slaughtered Animals for Food Purposes]. *Meat Technology*. 2023;(10):56–57. (In Russ.) EDN: UZJKMS
3. Fayvishevsky M.L. [New Solutions for the Processing and use of Certain Types of Special By-Products of Meat Raw Materials]. *Meat Technology*. 2021;(11):40–43. (In Russ.) EDN: TGHFEU
4. Fayvishevsky M.L. [Some Types of Multi-Purpose Equipment]. *Meat Technology*. 2020;(9):68–71. (In Russ.) EDN: GWQKEB

5. Fayvishevsky M.L. [Some Suggestions for Improving the Processing and Use of Animal Raw Materials]. *Meat Technology*. 2023;(7):40–41. (In Russ.) EDN: ZPZPGT
6. Fayvishevsky M.L. [On the Issue of Lean Production at Meat Processing Plants]. *Meat Technology*. 2021;(5):24–27. (In Russ.) EDN: FSXEAP
7. Kiseleva I.S., Rudik F.Ya., Romanova O.V. [Development of White Bone Powder Production Technology]. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;5:140–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i5pp140-145>
8. Osokin V.L., Novikova G.V., Mikhailova O.V., Belova M.V., Tikhonov A.A., Kazakov A.V. [Ultrahigh Frequency Installation with Coaxially Arranged Resonators for Heat Treatment and Sterilization of Ground Meat Raw Materials in Continuous Mode]. Patent 2,716,084 Russian Federation. 2020 May 03. 9 p. (In Russ.)
9. Novikova G.V., Voronov E.V., Prosviryakova M.V., Mikhailova O.V., Storchevoy V.F. Development and Substantiation of Parameters of an Installation with a Microwave Power Supply to a Biconic Resonator for Heat Treatment of Meat Raw Materials. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2023;(5):154–160. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-103-5-154-160>
10. Novikova G.V., Zhdankin G.V., Mikhailova O.V., Belov A.A. Analysis of Microwave Installations for Heat Treatment of Raw Materials. *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2016; 11;(4):89–93. (In Russ, abstract in Eng.) Available at: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/15648/view> (accessed 01.08.2023).
11. Mikhailova O.V., Gdankin G.V., Prosviryakova M.V., Novikova G.V., Storchevoy V.F. Microwave Heating of Slaughterhouse Confiscations to Increase the Feed Value. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;857:012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/857/1/012002>
12. Zhdankin, G.V. Storchevoy V.F., Novikova G.V., Umanskya P.M. Survey on UHF De-vice Operating Modes for Thermal Treatment and Disinfection of Nonfood Animal-Origin Raw Materials. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(1):94–99. <https://doi.org/10.3103/S1068367420010206>
13. Uglov V.A., Shelepov V.G., Borodai E.V., Slepchuk V.A. Prospects for Using Secondary Resources of Meat Processing Industries Based on Patent Research. *Innovations and Food Security*. 2020;(3):39–46. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-39-46>
14. Kazakov A.V., Novikova G.V., Gorbunov B.I., Tikhonov A.A. [Ultrahigh Frequency Installation with a Conical Resonator for Dehydration and Heat Treatment of Meat Waste]. Patent 2,710,154 Russian Federation. 2019 December 24. 10 p. (In Russ.)
15. Voronov E.V. Research and Justification of Parameters for a Microwave Setup Implementing a Resource-Saving Technology for Heat Treatment of Meat Waste. *Bulletin of NGIEI*. 2023;(8):33–43. (In Russ, abstract in Eng.) Available at: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=2269](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2269) (accessed 01.08.2023).
16. Novikova G.V., Voronov E.V., Mikhailova O.V., Prosviryakova M.V., Skvortsov Yu.A., Storchevoy V.F. [Microwave Installation with a Biconic Resonator and Packages of Plates for Heat Treatment of Meat and Bone Seizures]. Patent 2,803,127 Russian Federation. 2023 June 09. 22 p. (In Russ.)
17. Alekseychik L.V., Kurushin A.A. Modeling of excitation of a dielectric resonator by a plane electromagnetic wave field. *Journal of Radioelectronics*. 2020;11:1–16. (In Russ, abstract in Eng.) EDN: XYFOXB
18. Babak L.I., Kokolov A.A. [Creation of a Domestic CAD Platform for Designing Microwave Devices and Semiconductor ICS]. *Nanoindustry*. 2020;13:(54):377–378. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.377.378>
19. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Klygach D.S., Vakhitov M.G. Specific Features of Volume-Modular Technology Application in the Design of Microwave Electronic Devices. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91–103. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15826/urej.2021.5.2.001>
20. Tatarkin N.M., Zaitseva E.M., Shishakov K.V. [Development of Waveguide-Slit Antenna Arrays Through Complementarity of CST Microwave Studio and Compass-3D Programs]. *Intelligent Systems in Production*. 2023;21(2):69–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2023-2-69-80>
21. Titov E.V., Soshnikov A.A., Vasiliev V.Yu., Solovskoy A.S. Computer Simulation of Superimposed Electromagnetic Waves from Electromagnetic Field Sources in a Wide Frequency Range. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;(3):102–108. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209>
22. Kasimova A.U. [Comparative Analysis of Numerical Methods for Modeling a Microstrip Antenna]. *Problems of Automation and Control*. 2022;(3):31–41. (In Russ.) EDN: OCFQUY

23. Katkova T.O., Sedyshev E.Yu. [Microwave Generator on an Annular Elliptical Resonator in a Volumetric Integral Design]. *Microwave Electronics and Microelectronics*. 2021;1:430–433. (In Russ.) EDN: SWJDTM
24. Fomin D.G., Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Baranov V.K. The Investigation of the Volumetric Strip-Slot Transition with U-Shaped Slot Resonator. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):277–292. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15826/urej.2020.4.3.002>
25. Davidovich M.V., Kobetz A.K., Sayapin K.A. Excitation of a Rectangular Resonator Through Communication Windows in the Conveyor Installation of Microwave Heating. *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*. 2022;25(4):88–99. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.88-99>
26. Tukhvatullin M.I. Provision of Uniform Microwave Processing of Biological Substrates in a Microwave Electrical Installation. *Russian Electronic scientific Journal*. 2022;(4):22–32. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2022-46-4-22-32>
27. Tukhvatullin M.I. [Designs of Hybrid Microwave Electrotechnological Equipment for Processing Materials in Agriculture]. *Russian Electronic scientific journal*. 2023;(3):20–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2023-49-3-20-33>
28. Zakharov V.V., Trigorly S.V. Numerical and Field Research of Microwave Thermal Processing of Dielectrics in Microwave Travelling Wave Chambers. *Questions of electrotechnology*. 2020;(1):14–22. (In Russ, abstract in Eng.) EDN: VKMMXC
29. Smirnov S.V., Morozov G.A., Morozov O.G. Development of a Method for Monitoring the Parameters of the Microwave Processing of Animal Waste. *International Research Journal*. 2020;(11):67–73. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.101.11.010>
30. Vendin S.V. [Microwave EMF for Processing Raw Materials in the Agro-Industrial Complex]. *Instrumentation and automation: maintenance and repair*. 2020;9:38–41. (In Russ.) EDN: FACCAV
31. Gorlov I.F., Mirosnik A.S., Danilov Yu.D., Bozhkova S.E. Combined use of Ultrasonic Processing and Microwave Electric Field During Meat Raw Materials Defrosting. *Agrarian and food innovations*. 2022;(4):73–81. (In Russ, abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2022-20-73-81>
32. Titov E.V., Kryukov A.V., Seredkin D.A. Comparative Analysis of Approaches to Norming of Electromagnetic Field Under Production Conditions in Accordance with the Russian and European Regulatory Documents. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;(10):81–89. (In Russ, abstract in Eng.) Available at: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/1171> (accessed 01.08.2023).

*About the authors:*

**Galina V. Novikova**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a, Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>, [NovikovaGalinaV@yandex.ru](mailto:NovikovaGalinaV@yandex.ru)

**Alexander A. Tikhonov**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy (97, Gagarin St., Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3687-977X>, [tichonov57@mail.ru](mailto:tichonov57@mail.ru)

**Mariana V. Prosviryakova**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Russian Timiryazev State Agrarian University (6, Larch Alley, Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3258-260x>, Researcher ID: AAQ-1331-2021, [prosviryakova.maryana@yandex.ru](mailto:prosviryakova.maryana@yandex.ru)

**Vladimir F. Storchevoy**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin of the Russian Timiryazev State Agrarian University (6, Larch Alley, Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-3919>, Researcher ID: ABB-9545-2021, [vstorchevoy@mail.ru](mailto:vstorchevoy@mail.ru)

**Olga V. Mikhaylova**, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department "Infocommunication Technologies and Communication Systems" of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University (22a, Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9231-4733>, Researcher ID: GXV-1750-2022, [ds17823@yandex.ru](mailto:ds17823@yandex.ru)



**Alexander V. Storchevoy**, Senior Lecturer, Department of Social and Humanitarian Disciplines, Russian Biotechnological University (11, Volokolamskoe Shosse, 125080 Moscow, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3404-0361>, [alecks.10@mail.ru](mailto:alecks.10@mail.ru)

*Authors contribution:*

G. V. Novikova – scientific guidance, comparative analysis of structures, formulation of conclusions.

A. A. Tikhonov – calculation of the duration of thermomechanical processing of raw materials.

M. V. Prosviryakova – analysis of existing devices for heat treatment of fat-containing bone raw materials.

V. F. Storchevoy – determination of the effective design of the resonator for degreasing bone raw materials.

O. V. Mikhaylova – construction of a 3D model of installations, modeling of three-dimensional structures of the electromagnetic field in a volumetric resonator.

A. V. Storchevoy – layout and formatting of work, collection and processing of materials.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 11.09.2023; revised 10.11.2023; accepted 10.12.2023*

### Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

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

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

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

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Цель статьи (Aim of the Article);

3) Материалы и методы (Materials and Methods);

4) Результаты исследования (Results);

5) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

*Приводится на русском и английском языках.*

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список литературы** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад авторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

#### 10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением BOAI открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.



**Information for authors and readers of the journal**

*Engineering Technologies and Systems* journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and iThenticate systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

*The title should be written in Russian and English.*

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Aim of the Article;

3) Materials and Methods;

4) Results;

5) Discussion and Conclusion.

*The abstract should be written in Russian and English.*

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

*Keywords should be written in Russian and English.*

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

*Acknowledgements should be written in Russian and English.*

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

*References should be written in Russian and English.*

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

*Information about the authors should be written in Russian and English.*

9. **Authors contribution.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

*Contribution of the authors should be written in Russian and English.*

#### 10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizing. 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.

Редакторы – *А. Е. Каткова, Е. Н. Ширишкова*  
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 17.06.2024 г. Дата выхода в свет 28.06.2024 г.

Формат  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 13,97.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 306. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24  
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»)



Editors *A. E. Katkova, E. N. Shirshikova*  
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 17.06.2024. Date of publishing 28.06.2024.

Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 13.97.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 100 copies. Order no. 306. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)