

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

2023

**Том 33, № 4
Vol. 33, no. 4**

DOI: 10.15507/2658-4123

doi: 10.15507/2658-4123.033.202304

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

Том 33, № 4. 2023

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

16+



Vol. 33, no. 4. 2023

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

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

Подписной индекс – **70539**

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

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

© ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», 2023

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)
- 1.3.6. Оптика (технические науки)
- 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)
- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки)
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
- 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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





Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

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

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сенин Петр Васильевич – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, и. о. первого проректора 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, levtszepar@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

Чжень Дайфен – Ph.D., профессор, декан Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологии, директор Международной объединенной лаборатории по экологической энергетике судов и контролю выбросов 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 автоматизированного оборудования машиностроительного производства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ORCID: 0000-0002-1844-5011 (Воронеж, Российская Федерация)

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Шिशелова 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, Acting First Vice-Rector, National Research Mordovia State University, ORCID: [0000-0003-3400-7780](#), vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Saransk, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Oleg N. Kukharev – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Rector of Penza State Agrarian University,
ORCID: [0000-0002-3519-4066](#) (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, Head of the Laboratory for the Use of Lubricants and
Processed Oil Products, All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in
Agriculture, ORCID: [0000-0003-2927-768X](#) (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 Automated Equipment for Machine
Building Production, Voronezh State Technical University, 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

Лобачевский Я. П., Шемякин А. В., Лимаренко Н. В., Успенский И. А., Юхин И. А. Контрфактуальный анализ эффективности обеззараживания органических отходов животноводства	466
Чаплыгин М. Е., Жалнин Э. В., Шибряева Л. С., Подзоров А. В. Закономерности влияния густоты посева озимой пшеницы на ее урожайность	490
Лачуга Ю. Ф., Месхи Б. Ч., Пахомов В. И., Рудой Д. В., Камбулов С. И., Мальцева Т. А. Исследование изменения аминокислотного состава зерновых колосовых культур в процессе созревания	508

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Труфляк Е. В., Потебня А. Н. Параметры и режимы работы срезюще-измельчающего аппарата	524
Зинцов А. Н., Ковалев М. М., Перов Г. А., Перов М. Г., Добрецов В. А. Влияние процессов вспушивания ленты стеблей льна на структурные параметры слоя	542

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Каповский Б. Р., Пчелкина В. А., Дыдыкин А. С. Применение нечеткой и четкой математических моделей в гибридном управлении процессом одностадийного измельчения замороженного мясного сырья	558
--	-----

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Калабкин А. А., Кузнецов Е. А., Ивлиев С. Н., Ашрятов А. А. Калабкин В. А., Мусатов А. С. Разработка светодиодного фитооблучателя для выращивания растений в теплицах	585
Балджи М. С., Далджали А. Анализ мощности электромагнитных сборщиков с тороидальным сердечником для линий электропередачи	599
Информация для авторов и читателей	612



CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Lobachevsky Ya. P., Shemyakin A. V., Limarenko N. V., Uspensky I. A., Yukhin I. A. Counterfactual Analysis of the Efficiency of Decontamination of Livestock Production Organic Wastes	466
Chaplygin M. E., Zhalnin E. V., Shibryaeva L. S., Podzorov A. V. Patterns of Influence of Winter Wheat Sowing Density on Its Yield	490
Lachuga Yu. F., Meskhi B. Ch., Pakhomov V. I., Rudoy D. V., Kambulov S. I., Maltseva T. A. Study of Changes in the Amino Acid Composition of Spiked Cereals during the Ripening Process	508

AGRICULTURAL ENGINEERING

Truflyak E. V., Potebnya A. N. Parameters and Operation Modes of the Cutting and Chopping Apparatus	524
Zintsov A. N., Kovalev M. M., Perov G. A., Perov M. G., Dobretsov V. A. Influence of the Processes of Fluffing the Flax Stem Strips on the Structural Parameters of the Layer	542

FOOD SYSTEMS

Kapovskiy B. R., Pchelkina V. A., Dydykin A. S. Application of Fuzzy and Clear Mathematical Models in Hybrid Control of the Process of Single-Stage Mincing of Frozen Meat ...	558
---	-----

ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

Kalabkin A. A., Kuznetsov E. A., Ivliyev S. N., Ashryatov A. A., Kalabkin V. A., Musatov A. S. The Development of LED Grow Light for Greenhouse Cultivation	585
Balci M. S., Dalcali A. Power Analysis of Toroidal Core Electromagnetic Energy Harvesters for Transmission Lines	599
<i>Information for Authors and Readers of the Journal</i>	612

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 631.862.002.8

doi: [10.15507/2658-4123.033.202304.466-489](https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.466-489)

Оригинальная статья



Контрфактуальный анализ эффективности обеззараживания органических отходов животноводства

Я. П. Лобачевский¹, А. В. Шемякин², Н. В. Лимаренко^{2,3}✉,
И. А. Успенский², И. А. Юхин²

¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)

² Рязанский государственный агротехнологический университет
имени П. А. Костычева (г. Рязань, Российская Федерация)

³ Донской государственный технический университет
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

✉ limarenkodstu@yandex.ru

Аннотация

Введение. Реализация указа президента Российской Федерации, направленного на обеспечение продовольственной безопасности страны, требует индустриализации агропромышленного комплекса. Животноводство является сектором агропромышленного комплекса, образующим наибольшее количество отходов органического происхождения, являющихся потенциальными энергоносителями: подстильный и бесподстильный навоз, технологические стоки и т. п. Согласно данным Росстата и результатам исследований годовой объем навоза, образуемый от хозяйств, составляет порядка 43,3–45,1 млн тонн, при этом присутствует тренд роста. Используемый энергетический потенциал от всего объема не превышает 40 %. Повысить эффективность использования энергетического потенциала органических отходов животноводства возможно путем внедрения цифровизированных решений. Стратегическим инструментом, обеспечивающим эффективную индустриализацию отрасли, является внедрение прикладных программных продуктов, обеспечивающих рост экологического и энергетического эффектов.

Цель статьи. Контрфактуальная оценка эффективности модели обеззараживания свиного бесподстильного навоза в активаторе обеззараживания.

Материалы и методы. Контрфактуальный анализ – инструмент формализации сложных, многофакторных процессов, обеспечивающий их последующую цифровизацию. Его суть заключается в «опросе» анализируемой модели, посредством которого определяются значения варьируемых переменных, обеспечивающие изменения и приводящие к отклонению отклика за пределы граничных условий при

© Лобачевский Я. П., Шемякин А. В., Лимаренко Н. В., Успенский И. А., Юхин И. А., 2023



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

интерпретации. Преимуществом контрфактуального анализа является устойчивость и прозрачность модели к внешним воздействиям в ходе машинного обучения. Объектом исследования являлся свиной бесподстилочный навоз влажностью 88–98 %, предметом – контрфактуальный анализ зависимости числа колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий (далее – КОЕ ОКБ) от времени экспозиции в активаторе, концентрации активного хлора, массы рабочих тел, магнитной индукции, влажности бесподстилочного навоза.

Результаты исследования. Результаты контрфактуальной оценки и анализа с использованием языка программирования Python и среды PyCharm 2022.2 представлены в таблицах. Контрфактуальная оценка позволила выделить диапазоны варьирования факторов, использование которых способно представлять потенциал граничных условий при решении оптимизационной задачи. Ячейки данных значений выделены серо-голубым цветом. Наиболее предпочтительные диапазоны, основанные на контрфактуальной оценке, находятся в ячейках, выделенных зелёным цветом.

Обсуждение и заключение. Обоснована перспективность использования активного хлора в сочетании с воздействием шаровых ферромагнитных рабочих тел как активатора обеззараживания. На основании контрфактуальной оценки установлено, что наиболее значимыми факторами, определяющими эффективность обеззараживания свиного бесподстилочного навоза по числу КОЕ ОКБ, являются: магнитная индукция в рабочей зоне индуктора активатора, концентрация активного хлора, время экспозиции.

Ключевые слова: цифровизация агропромышленного комплекса, прикладные цифровые продукты, контрфактуальный анализ, свиной бесподстилочный навоз, эффективность обеззараживания, активатор обеззараживания, число колониеобразующих единиц

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в рамках Госзадания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации на тему: «Совершенствование методов обеззараживания стоков сельскохозяйственных предприятий», номер государственного учёта в ЕГИСУ НИОКТР АААА-А16-116060910025-5.

Для цитирования: Контрфактуальный анализ эффективности обеззараживания органических отходов животноводства / Я. П. Лобачевский [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 466–489. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.466-489>

Original article

Counterfactual Analysis of the Efficiency of Decontamination of Livestock Production Organic Wastes

Ya. P. Lobachevsky^a, A. V. Shemyakin^b, N. V. Limarenko^{b,c}✉, I. A. Uspensky^b, I. A. Yukhin^b

^a Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)

^b Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

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

✉ limarenkodstu@yandex.ru

Abstract

Introduction. The implementation of the decree of the President of the Russian Federation is aimed at ensuring the food security of the country and requires the industrialization of the agro-industrial sector. The effectiveness of industrialization depends on the use

of automated, intelligent solutions at all stages of implementing technological processes. Livestock is an agro-industrial sector generating the largest amount of organic waste materials, which are potential energy carriers: litter, liquid manure, process effluents, etc. According to the data from the Russian Statistics Committee and the research results, the annual volume of manure generated from farms is from 43.3 to 45.1 million tons, while there is an upward trend. The used energy potential from the entire volume does not exceed 40%. It is possible to increase the efficiency of using the energy potential of organic animal waste materials through implementing digitalized solutions. A strategic tool for the effective industrialization of livestock is the implementation of application software products that ensure the growth of ecological and energy effects.

Aim of the Article. The aim of the study is a counterfactual evaluation of the efficiency of the model for decontaminating liquid pig manure in the decontamination activator.

Materials and Methods. Counterfactual analysis is a tool for formalizing complex, multifactorial processes to ensure their subsequent digitalization. The essence of the analysis consists in a “survey” of the analyzed model through which the values of variables are determined providing changes that lead to a deviation of the response beyond the boundary conditions during interpretation. The advantage of counterfactual analysis is the stability and transparency of the model to external influences during machine learning.

It is known that the representative pathogenic markers of the decontamination efficiency of liquid pig manure are helminth eggs and the number of colony-forming units of common coliform bacteria (CFU CCB). However, for testing and implementing an algorithm for counterfactual analysis of a mathematical model, it is acceptable to use the number of CFU CCB. The object of the study was liquid pig manure with a humidity from 88% to 98%, the subject was a counterfactual analysis of the dependence of the number of CFU CCB on the exposure time in the activator, the concentration of active chlorine, the mass of working bodies, magnetic induction, and liquid manure humidity.

Results. The results of counterfactual evaluation and analysis carried with the use of the Python programming language and the PyCharm 2022.2 environment are presented in the tables. The counterfactual evaluation made it possible to identify ranges of variation of factors, the use of which can represent the potential of boundary conditions in solving the optimization problem. The cells of these values are highlighted in grey-blue. The most preferred ranges based on counterfactual evaluation are in the cells highlighted in green.

Discussion and Conclusions. There has been substantiated the prospects of using active chlorine in combination with the influence of ferromagnetic working bodies moving in an alternating rotating electromagnetic field as a decontamination activator. On the basis of counterfactual evaluation it was established that the most significant factors for determining the efficiency of decontamination of liquid pig manure by the number of CFU CCB are: magnetic induction in the working zone of the activator inductor, active chlorine concentration and exposure time.

Keywords: digitalization of the agro-industrial complex, applied digital products, counterfactual analysis, pig manure, disinfection efficiency, disinfection activator, number of colony-forming units

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

Funding: The study was carried out within the framework of the State Task of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation on the topic Counterfactual Analysis of the Efficiency of Decontamination of Organic Wastes from Livestock Production, State Registration Number in the USRSC R&D AAAA-A16-116060910025-5.

For citation: Lobachevsky Ya.P., Shemyakin A.V., Limarenko N.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A. Counterfactual Analysis of the Efficiency of Decontamination of Livestock Production Organic Wastes. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):466–489. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.466-489>

Введение

Согласно данным Организации Объединенных Наций, в мире ежегодно образуется более 1 млрд т продовольственных и сельскохозяйственных органических отходов. Это связано с технологическими процессами животноводства,

составляющими которых являются подстилочный и бесподстилочный навоз, технологические стоки, отходы кормления и другие продукты жизнедеятельности животных. В настоящее время энергетический потенциал данных органических систем используется не более чем на 35–40 %. Оставшиеся объемы представляют собой серьезную нагрузку на окружающие экосистемы. В Российской Федерации, согласно данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), а также статистическим данным Росстата за 2020–2022 гг., в агропромышленном комплексе образовалось порядка 150 млн т отходов. Усредненное ежегодное значение составляет порядка 45–47 млн т, из которых 95–97 % приходится на навоз и его отдельные разновидности, в том числе помет, подстилку и прочее. К сожалению, используемые технические решения по утилизации данного вида отходов не обеспечивают должной интенсивности, что приводит к недостаточному использованию потенциала органических отходов животноводства как потенциального энергоносителя. Отсутствие экологически безопасных и энергетически эффективных решений по интенсивному обеззараживанию органических отходов животноводства приводит к его внесению в почвы с высоким содержанием патогенных элементов, что увеличивает площадь эродированных земель. Ежегодный экономический убыток, связанный с данной проблемой, составляет порядка 25 млрд руб. Согласно отчету Минсельхоза России за 2019 год, объем производства свинины в России составил более 5,8 млн т, что является рекордным показателем за последние 30 лет. В 2020–2022 гг. данный показатель сохранялся на прежнем уровне. Известно, что обеспечить данный объем производства возможно использованием индустриального подхода к животноводству. Индустриализация животноводства требует бесподстилочного содержания свиней, а также высокопроизводительных и технологически эффективных технических решений по удалению и обеззараживанию жидких отходов. Доказано [1–9], что обеспечение обеззараживания свиного бесподстилочного навоза без совместного использования специфических цифровых инструментов на сегодняшний день затруднительно. Так, разработка цифровых решений, дополняющих используемые технические решения обеззараживания свиного бесподстилочного навоза, является актуальной задачей для науки, практическая составляющая которой позволит повысить экологическую безопасность и энергетическую эффективность.

Кроме значительной энергоемкости процесс обеззараживания и подготовки к нему свиного бесподстилочного навоза обладает высокой длительностью. В зависимости от климатических условий обеззараживание и подготовка к нему могут продолжаться от 6 до 9 месяцев, что приводит к значительным экономическим и экологическим убыткам. Интенсифицировать данный процесс возможно путем использования активаторов. Наиболее распространенными являются химические, физические и физико-химические. К химическим активаторам относят воздействия бактерицидными реагентами, к физическим – волновые воздействия механическими колебаниями на частоте ультразвука, а также воздействия электромагнитным полем с перемещающимися в нем ферромагнитными телами различной формы. Установлено [10–15], что использование физических и химических активаторов в комплексе, контролируемом цифровыми системами, является наиболее приоритетным направлением интенсификации обеззараживания свиного бесподстилочного навоза и органических отходов животноводства в целом.

Целью исследования является контрфактуальная оценка эффективности модели обеззараживания свиного бесподстилочного навоза в активаторе обеззараживания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– обосновать наиболее перспективный активатор обеззараживания свиного бесподстилочного навоза;

– определить наиболее значимые факторы эффективности обеззараживания свиного бесподстилочного навоза и модель, формализующую их;

– провести контрфактуальный анализ полученной модели.

Объект исследования – свиной бесподстилочный навоз влажностью 88–98 %, предмет – контрфактуальный анализ зависимости числа КОЕ ОКБ от времени экспозиции в активаторе, концентрации активного хлора, массы рабочих тел, магнитной индукции, влажности бесподстилочного навоза.

Обзор литературы

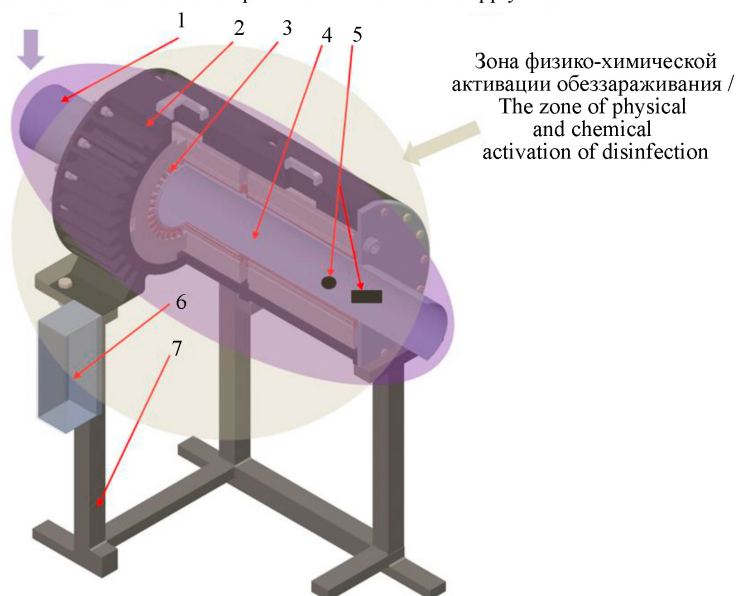
Обеззараживание – комплекс мероприятий, направленный на подавление патогенной составляющей обрабатываемой среды. Согласно исследованию В. Г. Тюрина, обеззараживание включает: дезинсекцию, дератизацию, дегазацию, дезактивацию, дезинфекцию [14]. Наиболее приоритетной составляющей описанного комплекса мероприятий в вопросе энергетически эффективного и экологически безопасного обеззараживания органических отходов являются эффекты, обеспечиваемые дезинфекцией. На основании проведенного анализа [11–24], а также результатов собственных исследований [24–26], сформулированы следующие требования к данной операции: устойчивый пролонгированный бактерицидный эффект, а также минимальное количество отрицательных побочных продуктов. К отрицательным побочным продуктам зачастую относят образование следующих элементов: тригалометанов, броматов, хлоратов, хлоритов, альдегидов, кетонов, органических кислот, бромсодержащих тригалометанов, броматов (в присутствии бромидов), пероксидов, бромуксусной кислоты и т. п.¹ Образование данных элементов приводит к необходимости внедрения дополнительных операций, направленных на их сепарацию, удаление и энергетически эффективную утилизацию. Установлено [24; 26], что наиболее рациональным вариантом обеззараживания органических отходов животноводства является использование комбинированных физико-химических воздействий. Доказана эффективность использования хлорсодержащих реагентов, среди которых хлорная известь $\text{Ca}(\text{Cl})\text{OCl}$, гипохлорит натрия NaClO , диоксид хлора ClO_2 , хлорамин NH_2Cl [13; 14; 19; 22]. Обобщенно механизм подавления активности патогенных форм с использованием описанных реагентов можно представить следующим образом: хлорноватистая кислота взаимодействует с гипохлорит ионами протоплазмы, находящимися в органических отходах, что вызывает течение окислительно-го процесса с последующей деградацией и лизисом жизненно важных путей патогенов. Отмечен положительный опыт обеззараживания с использованием наночастиц серебра [27; 28]. В отличие от традиционного бактериостатического подавления активности патогенов олигодинамическими реагентами, использование наночастиц серебра позволяет проникать в протоплазму и цитоплазму клеток, что приводит к их естественному лизису. Существенными преимуществами использования химических составляющих при обеззараживании органических

¹ Лимаренко Н. В. Повышение эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.20.01. Рязань, 2022. 397 с.

отходов животноводства является обеспечение устойчивого пролонгированного бактерицидного эффекта, эффективность против большинства психрофильных и мезофильных патогенных форм.

На основании проведенных экспериментальных исследований, методик и результатов, которые подробно описаны в исследовании ряда авторов, доказано, что наиболее перспективным способом обеззараживания органически отходов животноводства является использование воздействий, сочетающих физические и химические эффекты¹ [29]. Одной из систем, позволяющих реализовать данные требования, являются электромагнитные активаторы. Общий вид активатора в разрезе представлен ниже (рис. 1).

Зона подачи химического активатора / Chemical activator supply zone



Р и с. 1. Общий вид активатора обеззараживания в разрезе:

- 1 – труба рабочей зоны; 2 – корпус; 3 – индуктор; 4 – пространство рабочей зоны;
5 – стержневые или шаровые рабочие ферромагнитные тела; 6 – шкаф управления;
7 – станина устройства

F i g. 1. General view of the decontamination activator in the section:

- 1 – working area pipe; 2 – housing; 3 – inductor; 4 – working area space;
5 – rod or ball working ferromagnetic bodies; 6 – control cabinet; 7 – the device frame

Опыт использования данных систем в смежных областях описан в работах П. И. Гриднева, Д. А. Ковалева и др. [30–34]. Электромагнитный активатор представляет собой индуктор, создающий вращающееся переменное электромагнитное поле, рабочая зона которого является открытым цилиндром, находящимся в рас-точке индуктора с перемещающимися внутри ферромагнитными телами. Согласно исследованиям [35; 36], геометрия, масса рабочих тел и уровень заполненности ими рабочей зоны электромагнитного активатора оказывают значительное влияние на эффективность реализуемых процессов. В данном случае под эффективностью понимается соотношение уровня энергетических затрат к совокупности

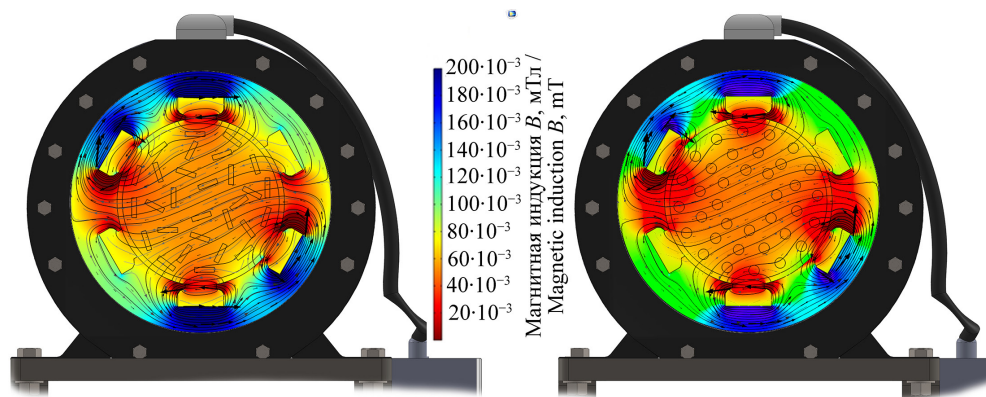
количественных показателей, определяющих качество. Установлено, что данное физическое воздействие значительно интенсифицирует химические реакции. Положительной составляющей данного эффекта является получение безопасного с санитарно-эпидемиологической точки зрения продукта за меньший промежуток времени и с наименьшими энергозатратами.

Из анализа рисунка 1 видно, что зона подачи химического активатора обеззараживания располагается непосредственно перед воздействием индуктора. Подача химического активатора осуществляется путём массового дозирования в трубу рабочей зоны. Методика приготовления химического активатора и их типы подробно описаны в работах [25; 29]. Согласно следующим проанализированным источникам [22; 24; 29], наиболее предпочтительным химическим активатором обеззараживания бесподстилочного навоза является активный хлор, положительный опыт использования которого описан в нескольких рассмотренных нами работах [14–18; 29]. Отличительным признаком использования данного химического активатора является его сниженная концентрация, обусловленная последующей интенсификацией. Данный способ обеззараживания бесподстилочного навоза защищен патентом Российской Федерации на изобретение № 2723609.

Бесподстилочный навоз совместно с химическим активатором далее подается в технологическое пространство рабочей зоны, в котором происходит воздействие вращающегося переменного магнитного поля промышленной частоты и перемещающихся в нем ферромагнитных тел. Результаты сопоставления данных имитационного моделирования влияния массы и геометрии рабочих тел на его энергетические характеристики в среде Comsol Multiphysics представлены на рисунке 2. Согласно данным исследований [32–36], геометрия и масса используемых рабочих тел оказывают значительное влияние на эффективность обеззараживания. Доказано [34; 35], что наиболее рациональным является использование стержневой и шаровой формы рабочих тел. С целью проверки приведенных данных было принято решение провести исследование [35], суть которого заключалась в имитационном моделировании влияния массы и геометрии ферромагнитных тел, перемещающихся во вращающемся переменном магнитном поле индуктора, на энергетические характеристики: активную, реактивную, полную мощности, уровень магнитной индукции. Моделирование осуществлялось на основании результатов исследований [36]. Методика, условия, параметры моделирования описаны в работе А. А. Лаврентьева и др. [35].

Анализ результатов, представленных на рисунке 2, позволил сделать следующие выводы: при минимальной массе ферромагнитных стержневых рабочих тел уровень магнитной индукции составляет $B \approx 38–40$ мТл, при максимальной $B \approx 54–57$ мТл, при минимальной массе шаровых ферромагнитных рабочих тел $B \approx 50$ мТл, при максимальной $B \approx 68–72$ мТл [35]. Был сделан вывод о наибольшей перспективности использования шаровых ферромагнитных рабочих тел в качестве физического активатора.

Проведённый анализ источников позволил выделить наиболее существенные факторы, оказывающие влияние на эффективность активации обеззараживания бесподстилочного навоза физико-химическим воздействием. К ним относятся: концентрация химического активатора, масса шаровых ферромагнитных рабочих тел, магнитная индукция в рабочей зоне индуктора, влажность бесподстилочного навоза и время экспозиции материала с активатором.



Р и с. 2. Сопоставление результатов моделирования влияния массы и геометрии ферромагнитных рабочих тел на энергетические характеристики активатора в среде Comsol Multiphysics

Fig. 2. Comparison of simulation results of the influence of the mass and geometry of ferromagnetic working bodies on the energy characteristics of the activator in the Comsol Multiphysics environment

После определения конструктивно-технологических параметров активатора обеззараживания бесподстильного навоза необходимо выбрать наиболее представительные маркеры, определяющие эффективность процесса. Анализ информационных источников [18; 21; 23], результатов испытаний [25; 29], а также нормативных документов позволил с достаточной степенью достоверности принять в качестве данного маркера число КОЕ ОКБ. Известно, что общие колиформные бактерии включают в себя следующие виды микроорганизмов: *Escherichia coli* (*E. coli*), *Enterobacter* spp., *Klebsiella* spp., *Citrobacter* spp. Это граммотрицательные бактерии, присутствующие в кишечнике животных и человека, они являются представительным маркером фекального загрязнения среды [24; 26; 29]. Известно, что концентрация ОКБ в бесподстильном навозе в значительной мере варьируется в зависимости от вида животных, рациона их питания, условий и формы содержания. Однако концентрация ОКБ в свежем бесподстильном навозе составляет не менее $10\text{--}30 \cdot 10^6$ колоний на грамм, что делает их информативным маркером эффективности обеззараживания.

Материалы и методы

После обоснования наиболее перспективного активатора обеззараживания, выбора маркера, определяющего эффективность воздействия, на основании исследований сформулируем диапазоны варьирования наиболее значимых факторов. Диапазоны варьирования факторов, входящих в анализируемую модель, представлены в таблице 1.

Так как физико-химическая активация процесса обеззараживания бесподстильного навоза физико-химическим воздействием является многофакторной задачей, вклад в которую вносят не только отдельные оценки коэффициентов описанных факторов, но и их парные взаимодействия, в качестве модели, формализующей их связь, была выбрана следующая зависимость:

$$\bar{y} = b_0' + \sum_{i=1}^k b_i' x_i + \sum_{ji=1}^k b_{ij}' x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii}' (x_{ii}^2 - \beta). \quad (1)$$

Т а б л и ц а 1
Table 1

Факторы, входящие в анализируемую модель, и уровни их варьирования
Factors included in the analyzed model and the levels of their variation

№	Факторы / Factors	Об. / Des.	Ниж. / Low	Нул. / Middle	Вер. / High
1	Концентрация активного хлора ω в мг/л / Concentration of active chlorine ω in mg/l	x_1	10	13	16
2	Масса шаровых ферромагнитных рабочих тел m , гр. / Mass of spherical ferromagnetic working bodies m , gr.	x_2	600	1 000	1 400
3	Магнитная индукция B в мТл / Magnetic induction B , mTl	x_3	40	60	80
4	Влажность бесподстилочного навоза W , % / Humidity of liquid manure W , %	x_4	88	93	98
5	Время экспозиции активатора t в с / Activator exposure time t , s	x_5	6	9	12

Оценка адекватности полученной модели осуществлялась в соответствии со стандартной методикой, реализованной в программном пакете Statistica. Кроме пакета Statistica также возможно использование программы Matlab, технологии библиотек Pandas, Matplotlib в среде языка программирования Python. Алгоритм оценки адекватности подобных моделей подробно описан в исследованиях [29]. Фундаментальные основы оценки адекватности статистических моделей как исходных данных для проведения контрфактуального анализа описаны в рассмотренных нами работах². В ходе анализа описанных информационных источников наиболее значимыми критериями оценки адекватности статистической модели как исходных данных для контрфактуального анализа является определение соотношений расчетных и критических значений критериев Стьюдента и Фишера. Расчетное значение критерия Фишера определяется отношением дисперсии адекватности к дисперсии воспроизводимости:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{восп}^2} = \frac{\frac{1}{N-L} \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y}_j)^2}{\frac{1}{n_0-1} \sum_{i=1}^{n_0} (y_{oi} - \bar{y}_0)^2}, \quad (2)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности; $S_{восп}^2$ – дисперсия воспроизводимости; N – общее число опытов; L – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии; y_j – экспериментальные значения отклика; $\bar{y}_j$ – значения отклика, рассчитанные по уравнению регрессии; n_0 – число опытов в центре плана; $\bar{y}_0$ – среднее значение отклика в центре плана.

После обоснования выбора модели, наиболее достоверно формализующей исследуемые зависимости, были проведены экспериментальные исследования, методика которых описана в нескольких рассмотренных нами источниках [29; 37].

В результате была получена математическая модель зависимости числа КОЕ ОКБ от варьируемых факторов при обеззараживании комплексным физико-химическим воздействием в активаторе:

² Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : уч. пособие для вузов. М. : Высш. шк., 2003. 479 с.; Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгдел К. Оптимизация в технике. В 2-х кн. Кн. 1. М. : Мир, 1986. 349 с.

$$y_1 = 85,04 - 7,86x_3^2 - 5,97x_5^2 + 10,26x_1 + 10,35x_2 - 15,30x_4 + 13,38x_5 - \\ - 7,90x_1x_2 - 7,90x_1x_3 - 8,10x_1x_4 - 6,65x_1x_5 - 7,90x_2x_3 - 8,10x_2x_4 - \\ - 6,65x_2x_5 - 8,10x_3x_4 - 6,65x_3x_5 - 9,35x_4x_5, \quad (3)$$

где x_1 – концентрация активного хлора ω в мг/л; x_2 – масса шаровых ферромагнитных рабочих тел m , гр; x_3 – уровень магнитной индукции в рабочей зоне B , мТл; x_4 – влажность бесподстилочного навоза W , %; x_5 – время экспозиции активатора t в с.

Критическое значение критерия Стьюдента – 4,303, уровень значимости $\alpha = 0,05$, число степеней свободы – 2. Расчётное значение критерия Фишера – $F_p = 4,195$, критическое значение критерия Фишера – $F_{кр} = 5,87$. Поскольку $F_p < F_{кр}$, модель (3) является адекватной.

Осуществив необходимые проверки модели (3) и убедившись в ее адекватности с математической точки зрения, используя известные преобразования осуществим переход от кодированного представления к натуральному для дальнейшего удобства исследования.

Раскодирование модели является важным этапом для ее последующего контрфактуального анализа, так как оно позволяет сделать его наиболее приемлемым с математической точки зрения. Обобщенно процесс раскодирования модели (3) представим следующим образом:

$$y_1 = 85,04 - 7,86 \cdot \frac{x_3^2 - 60}{20} - 5,97 \cdot \frac{x_5^2 - 9}{3} + 10,26 \cdot \frac{x_1 - 13}{3} + 10,35 \cdot \frac{x_2 - 1000}{400} - \\ - 15,30 \cdot \frac{x_4 - 93}{5} + 13,38 \cdot \frac{x_5 - 9}{3} - \frac{7,90}{3 \cdot 400} (x_1 - (-13))(x_2 - (-1000)) + \\ + \frac{7,90}{3 \cdot 20} (x_1 - (-13))(x_3 - (-60)) - \frac{8,10}{3 \cdot 5} (x_1 - (-13))(x_4 - (-93)) - \\ - \frac{6,65}{3 \cdot 3} (x_1 - (-13))(x_5 - (-9)) - \frac{7,90}{400 \cdot 20} (x_2 - (-1000))(x_3 - (-60)) - \\ - \frac{8,10}{400 \cdot 5} (x_2 - (-1000))(x_4 - (-93)) - \frac{6,65}{400 \cdot 3} (x_2 - (-1000))(x_5 - (-9)) - \\ - \frac{8,10}{20 \cdot 5} (x_3 - (-60))(x_4 - (-93)) - \frac{6,65}{20 \cdot 3} (x_3 - (-60))(x_5 - (-9)) - \\ - \frac{9,35}{5 \cdot 3} (x_4 - (-93))(x_5 - (-9)). \quad (4)$$

После раскодирования модель (3) примет следующий вид:

$$KOE OKB = -2881,4133 - 0,0197B^2 - 0,6633t^2 + 74,7733\omega + 0,5972m - \\ - 24,6000W + 96,1672t - 0,0006\omega m - 0,1300\omega B - 0,5400\omega W - 0,74\omega t - \\ - 0,0010mB - 0,0041mW - 0,0055mt - 0,0810BW - 0,1108Bt - 0,6233Wt. \quad (5)$$

После получения исходных данных, осуществим контрфактуальный анализ модели (5). Рассмотрим его основные составляющие. Контрфактуальный анализ (или анализ контрфактуальных ситуаций) – метод исследования, позволяющий оценить

последствия различных решений, событий или действий, которые могли бы произойти, если бы были изменены определенные факторы или условия. Суть анализа заключается в создании «контрфактуальных» сценариев, которые предполагают изменение определенных факторов или условий в прошлом или в будущем, чтобы определить, какие были бы последствия для системы. Данный метод рационально использовать при оценке достоверности математических моделей, являющихся исходными данными для построения интеллектуализированных систем принятия решений. В работах зарубежных ученых [38–40] отмечен положительный опыт использования данной методологии в задачах оценки эффективности различных политических, экономических, социальных или технологических решений. Контрфактуальный анализ позволяет оценить, какие факторы являются ключевыми для определенного явления или системы, какие изменения в этих факторах могут привести к определенным результатам, что позволяет определить оптимизационный потенциал системы и его конкретные количественные границы. В качестве инструмента реализации контрфактуального анализа был выбран язык программирования Python, в качестве среды – PyCharm 2022.2. С помощью описанных инструментов был реализован скрипт, позволяющий провести контрфактуальный анализ нелинейных регрессионных моделей.

Результаты исследования

Результаты контрфактуального анализа с использованием описанных инструментов представлены в таблицах 2, 9. В таблице 2 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях: концентрация активного хлора 4–11 мг/литр в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 секунд. Анализ представленных данных позволит сделать вывод об отсутствии целесообразности использования приведенных диапазонов при обеззараживании навоза, так как полученные значения числа КОЕ ОКБ не соответствуют предъявляемым к нему санитарно-эпидемиологическим требованиям.

Таблица 2

Table 2

Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
концентрация активного хлора 4–11 мг/литр. Время экспозиции активатора
Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:
concentration of active chlorine is 4–11 mg/liter. Activator exposure time

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs		Концентрация активного хлора ω , мг/л / Concentration of active chlorine ω in mg/l							
		4	5	6	7	8	9	10	11
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	227	222	217	212	208	203	198	193
	3	222	217	212	208	203	198	193	189
	4	217	212	208	203	198	193	189	184
	5	212	208	203	198	193	189	184	179
	6	208	203	198	193	189	184	179	174
	7	203	198	193	189	184	179	174	170
	8	198	193	189	184	179	174	170	165
	9	193	189	184	179	174	170	165	160
	10	189	184	179	174	170	165	160	155
	11	184	179	174	170	165	160	155	151
	12	179	174	170	165	160	155	151	146
	13	174	170	165	160	155	151	146	141
	14	170	165	160	155	151	146	141	137
	15	165	160	155	151	146	141	137	132
	16	160	155	151	146	141	137	132	127
	17	155	151	146	141	137	132	127	122
	18	151	146	141	137	132	127	122	118

В таблице 3 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях концентрации активного хлора 12–19 мг/л в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 секунд. Анализ данных, представленных в таблице 3, позволит сделать вывод о том, что наибольший экологический эффект с точки зрения санитарно-эпидемиологических требований, предъявляемых к навозу и определяющих его безопасность, дают: концентрация активного хлора 19 мг/л при времени экспозиции 14 секунд, концентрация активного хлора от 17 до 18 мг/л при времени экспозиции 15 секунд, концентрация активного хлора от 16 до 19 мг/л при времени экспозиции 16 секунд, концентрация активного хлора от 15 до 19 мг/л при времени экспозиции 17 секунд, концентрация активного хлора от 14 до 19 мг/л при времени экспозиции 18 секунд. Приведенные значения обеспечивают число КОЕ ОКБ, не превышающее 100 шт., что является предпочтительным с точки зрения требований Методических указаний 2.1.5.3692-21. Описанные значения выделены зеленым цветом ячеек таблицы 3. Кроме наиболее предпочтительных сочетаний диапазонов факторов, обеспечивающих реализацию предъявляемых требований, алгоритм контрфактуального анализа позволяет выделить диапазоны, использование которых способно представлять потенциал граничных условий при решении оптимизационной задачи. Ячейки данных значений выделены серо-голубым цветом. Принцип выбора алгоритмом данных значений основан на оценке весовой значимости коэффициентов модели (5). На текущий момент значимость весовых коэффициентов уравнения интерпретирует исследователь. Для оценки адекватности диапазонов оптимизационного потенциала исследуемой модели (5) и подтверждения или опровержения выдвинутой гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований, что является отдельной задачей и не входит в алгоритм контрфактуального анализа.

Таблица 3

Table 3

Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
концентрация активного хлора 12–19 мг/литр. Время экспозиции активатора
Results of the counterfactual analysis of the model under the following conditions:
concentration of active chlorine is 12–19 mg/liter. Activator exposure time

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU ОКБ, pcs.		Концентрация активного хлора ω , мг/л / Concentration of active chlorine ω in mg/l							
		12	13	14	15	16	17	18	19
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	189	184	179	174	170	165	160	155
	3	184	179	174	170	165	160	155	151
	4	179	174	170	165	160	155	151	146
	5	174	170	165	160	155	151	146	141
	6	170	165	160	155	151	146	141	137
	7	165	160	155	151	146	141	137	132
	8	160	155	151	146	141	137	132	127
	9	155	151	146	141	137	132	127	122
	10	151	146	141	137	132	127	122	118
	11	146	141	137	132	127	122	118	113
	12	141	137	132	127	122	118	113	108
	13	137	132	127	122	118	113	108	103
	14	132	127	122	118	113	108	103	99
	15	127	122	118	113	108	103	99	94
	16	122	118	113	108	103	99	94	89
	17	118	113	108	103	99	94	89	84
	18	113	108	103	99	94	89	84	80

В таблицах 4 и 5 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях изменения массы шаровых ферромагнитных рабочих тел в диапазоне от 300 до 1 800 гр. в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 секунд. Анализ данных, представленных в таблицах 4 и 5, позволит сделать вывод об отсутствии прямого влияния данного фактора на число КОЕ ОКБ. Масса рабочих тел является сопутствующим фактором, оказывающим влияние на интенсивность активации обеззараживания навоза, следовательно его действие проявляется при межфакторном взаимодействии, что подтверждается наличием соответствующих оценок коэффициентов в модели (5).

Таблица 4
Table 4

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
масса рабочих тел 300–1000 г. Время экспозиции активатора**
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:
Mass of working bodies 300–1000 g. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.	Масса рабочих тел m , гр. / Mass of spherical ferromagnetic working bodies m , gr.								
	300	400	500	600	700	800	900	1000	
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	522	515	508	500	493	485	478	471
	3	520	512	505	497	490	483	475	468
	4	517	509	502	495	487	480	472	465
	5	514	507	499	492	485	477	470	462
	6	511	504	497	489	482	474	467	460
	7	509	501	494	486	479	472	464	457
	8	506	498	491	484	476	469	461	454
	9	503	496	488	481	474	466	459	451
	10	500	493	486	478	471	463	456	449
	11	498	490	483	475	468	461	453	446
	12	495	488	480	473	465	458	451	443
	13	492	485	477	470	463	455	448	440
	14	489	482	475	467	460	452	445	438
	15	487	479	472	465	457	450	442	435
	16	484	477	469	462	454	447	440	432
	17	481	474	466	459	452	444	437	429
	18	478	471	464	456	449	441	434	427

В таблицах 6 и 7 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях изменения уровня магнитной индукции, создаваемой индуктором в рабочей зоне активатора в диапазоне от 25 до 100 мТл в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 сек. Как показал анализ полученных результатов, обеспечение требований санитарно-эпидемиологической безопасности, предъявляемых к навозу, начинается выполняться при значениях магнитной индукции от 55 мТл и времени экспозиции 18 с.

Таблица 5
Table 5

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
масса рабочих тел 1100–2000 гр. Время экспозиции активатора**
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:
Mass of working bodies 1100–2000 gr. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.		Масса рабочих тел m , гр. / Mass of spherical ferromagnetic working bodies m , gr.							
		1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	463	456	448	441	434	426	419	411
	3	460	453	446	438	431	423	416	409
	4	458	450	443	435	428	421	413	406
	5	455	448	440	433	425	418	411	403
	6	452	445	437	430	423	415	408	400
	7	449	442	435	427	420	412	405	398
	8	447	439	432	424	417	410	402	395
	9	444	437	429	422	414	407	400	392
	10	441	434	426	419	412	404	397	389
	11	438	431	424	416	409	401	394	387
	12	436	428	421	414	406	399	391	384
	13	433	426	418	411	403	396	389	381
	14	430	423	415	408	401	393	386	378
	15	428	420	413	405	398	391	383	376
	16	425	417	410	403	395	388	380	373
	17	422	415	407	400	392	385	378	370
	18	419	412	404	397	390	382	375	367

Таблица 6
Table 6

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
уровень магнитной индукции 25–60 мТл. Время экспозиции активатора**
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:
magnetic induction level 25–60 mT. Activator exposure time**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.		Магнитная индукция B в мТл / Magnetic induction B , mT							
		25	30	35	40	45	50	55	60
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	198	189	180	171	163	154	145	137
	3	195	186	177	168	160	151	142	134
	4	192	183	174	166	157	148	139	131
	5	189	180	171	163	154	145	136	128
	6	186	177	168	160	151	142	133	125
	7	183	174	165	157	148	139	131	122
	8	180	171	162	154	145	136	128	119
	9	177	168	159	151	142	133	125	116
	10	174	165	156	148	139	130	122	113
	11	171	162	153	145	136	127	119	110
	12	168	159	150	142	133	124	116	107
	13	165	156	147	139	130	121	113	104
	14	162	153	145	136	127	118	110	101
	15	159	150	142	133	124	115	107	98
	16	156	147	139	130	121	112	104	95
	17	153	144	136	127	118	110	101	92
	18	150	141	133	124	115	107	98	89

Таблица 7
Table 7

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
уровень магнитной индукции 65–110 мТл. Время экспозиции активатора**
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:
Magnetic induction level 65–110 mT. Activator exposure time**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.		Магнитная индукция B в мТл / Magnetic induction B , mT							
		65	70	75	80	85	90	95	100
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	128	119	111	102	93	84	76	67
	3	125	116	108	99	90	81	73	64
	4	122	113	105	96	87	79	70	61
	5	119	110	102	93	84	76	67	58
	6	116	107	99	90	81	73	64	55
	7	113	104	96	87	78	70	61	52
	8	110	101	93	84	75	67	58	49
	9	107	98	90	81	72	64	55	46
	10	104	96	87	78	69	61	52	43
	11	101	93	84	75	66	58	49	40
	12	98	90	81	72	63	55	46	37
	13	95	87	78	69	60	52	43	34
	14	92	84	75	66	58	49	40	31
	15	89	81	72	63	55	46	37	28
	16	86	78	69	60	52	43	34	25
	17	83	75	66	57	49	40	31	23
	18	80	72	63	54	46	37	28	20

Исходя из результатов предварительно проведенных исследований [35–37], можно сделать вывод о том, что уровень энергозатрат при данной продолжительности будет непропорционален санитарно-эпидемиологическому эффекту. Наибольшее санитарно-эпидемиологическое соответствие числа КОЕ ОКБ наблюдается при значениях магнитной индукции от 65 мТл и времени экспозиции 12 сек., при увеличении магнитной индукции до 70 мТл время экспозиции составляет от 9 сек., при 75 мТл – от 6 сек., а при 85–100 мТл – от 2 сек. Кроме полученных данных в таблицах 6 и 7 выделены серо-голубым цветом ячейки, представляющие собой потенциал диапазона варьирования при решении оптимизационной задачи. Уровень магнитной индукции в данных ячейках составляет от 50 до 80 мТл при времени экспозиции от 18 до 2 сек.

На основании изложенного, проведенных ранее исследований [35–37] и анализа весовых оценок коэффициентов модели (5) можно сделать вывод о том, что магнитная индукция является значимым фактором, определяющим интенсивность активации навоза. Контрфактуальный анализ показал, что существенное влияние на нее оказывают парные межфакторные взаимодействия.

В таблицах 8 и 9 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях изменения влажности бесподстилочного навоза в диапазоне от 86 до 99 % в зависимости от времени его экспозиции от 2 до 18 секунд. Анализ данных, позволит сделать вывод об отсутствии прямого влияния данного фактора на число КОЕ ОКБ. Влияние влажности бесподстилочного навоза и времени экспозиции в диапазоне от 2 до 18 сек. на число КОЕ ОКБ без учета межфакторных взаимодействий является недостаточно корректным [37].

Т а б л и ц а 8

Table 8

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
влажности бесподстилочного навоза 86–91 %. Время экспозиции активатора**
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:
humidity of liquid manure 86–91 %. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.		Влажность бесподстилочного навоза W , % / Humidity of liquid manure W , %					
		86	87	88	89	90	91
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	225	224	224	223	222	222
	3	225	224	224	223	222	221
	4	225	224	224	223	222	221
	5	225	224	224	223	222	221
	6	225	224	223	223	222	221
	7	225	224	223	223	222	221
	8	225	224	223	223	222	221
	9	225	224	223	223	222	221
	10	225	224	223	222	222	221
	11	225	224	223	222	222	221
	12	225	224	223	222	222	221
	13	224	224	223	222	221	221
	14	224	224	223	222	221	221
	15	224	224	223	222	221	221
	16	224	224	223	222	221	221
	17	224	223	223	222	221	220
	18	224	223	223	222	221	220

Т а б л и ц а 9

Table 9

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:
влажности бесподстилочного навоза 92–99 %. Время экспозиции активатора**
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:
humidity of liquid manure 92–99 %. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU OKB, pcs.		Влажность бесподстилочного навоза W , % / Humidity of liquid manure W , %							
		92	93	94	95	96	97	98	99
Время экспозиции активатора t , с / Activator exposure time t , s	2	221	220	219	219	218	217	216	216
	3	221	220	219	218	218	217	216	216
	4	221	220	219	218	218	217	216	215
	5	221	220	219	218	218	217	216	215
	6	221	220	219	218	218	217	216	215
	7	220	220	219	218	217	217	216	215
	8	220	220	219	218	217	217	216	215
	9	220	220	219	218	217	217	216	215
	10	220	219	219	218	217	217	216	215
	11	220	219	219	218	217	216	216	215
	12	220	219	219	218	217	216	216	215
	13	220	219	219	218	217	216	216	215
	14	220	219	218	218	217	216	216	215
	15	220	219	218	218	217	216	215	215
	16	220	219	218	218	217	216	215	215
	17	220	219	218	218	217	216	215	215
	18	220	219	218	217	217	216	215	214

Обсуждение и заключение

Таким образом, использование контрфактуального анализа позволяет с минимальными энергозатратами определить направление дальнейшего уточнения математической модели, а также ее потенциал при решении оптимизационной задачи. Результатом контрфактуального анализа является расширение области интереса варьируемого фактора и понимания тесноты его парных взаимодействий.

В результате оценки эффективности обеззараживания свиного бесподстилочного навоза по числу КОЕ ОКБ методом контрфактуального анализа получены следующие результаты:

- обоснована перспективность использования активного хлора в сочетании с воздействием шаровых ферромагнитных рабочих тел, перемещающихся в переменном вращающемся электромагнитном поле;

- наиболее значимыми факторами, определяющими эффективность обеззараживания свиного бесподстилочного навоза по числу КОЕ ОКБ, являются: магнитная индукция в рабочей зоне индуктора активатора, концентрация активного хлора, время экспозиции. Наиболее предпочтительной моделью, формализующей данную связь, является квадратичный полином, учитывающий эффекты парного взаимодействия факторов;

- на основании контрфактуального анализа модели (5) установлено, что область интереса варьирования фактора допустимо расширить от 13 до 19 мг/литр для обеспечения требуемого санитарно-эпидемиологического эффекта, магнитную индукцию в рабочей зоне – от 50 до 100 мТл, расчетное значение критерия Фишера $F_p = 4,195$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Полученные результаты представляют собой исходные данные для создания интеллектуализированной цифровой системы оценки эффективности обеззараживания свиного бесподстилочного навоза и органических отходов в целом. Алгоритм контрфактуального анализа математических моделей позволяет оценить пределы их корректного функционирования, что позволяет повысить достоверность управления операциями и технологическими процессами в рамках их интеллектуализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pig Manure Management: a Methodology for Environmentally Friendly Decision-making / A. Y. Izmailov [et al.] // *Animals*. 2022. Vol. 12, Issue 6. 747 с. <https://doi.org/10.3390/ani12060747>
2. Personal Problems in Russian Digital Agriculture / A. G. Ibragimov [et al.] // *Unlocking Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technology Advances, Digital Ecosystems, and Innovative Firm Governance*. Springer International Publishing. 2023. P. 283–290. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_29
3. Zhong Y., Tang L., Li Y. Role of Digital Empowerment in Developing Farmers' Green Production by Agro-Tourism Integration in Xichong, Sichua // *Agriculture*. 2022. Issue 12. P. 1761. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111761>
4. Digital System for Monitoring and Management of Livestock Organic Waste / A. Y. Izmailov [et al.] // *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Issue 121. P. 22–33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_3
5. Экологоэнергетический показатель внедрения наилучших доступных технологий утилизации куриного помета / А. Ю. Брюханов [и др.] // *Экология и промышленность России*. 2019. № 12. С. 29–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-29-33>
6. Kirilenko V., Dobrokvashina K. Agro-Industrial Complex of Russia: Problems and Prospects // *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022" Global Precision Ag Innovation 2022*. 2023. Vol. 2. P. 1071–1078. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_121



7. Trukhachev V. I. Further Research Directions for Fostering Digital Transformation of Agriculture in Russia and Beyond // *Unlocking Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technology Advances, Digital Ecosystems, and Innovative Firm Governance*. 2023. P. 299–303. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_31
8. He Z., Jia Y., Ji Y. Analysis of Influencing Factors and Mechanism of Farmers' Green Production Behaviors in China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, Issue 2. P. 961. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020961>
9. Advances in Recycling and Utilization of Agricultural Wastes in China: Based on Environmental Risk, Crucial Pathways, Influencing Factors, Policy Mechanism / B. Wang [et al.] // *Procedia Environ.* 2016. Vol. 31. P. 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.002>
10. Nicholas H. L., Mabbett I. Drying Dairy Manure Using a Passive Solar Still: A Case Study // *Energy Nexus*. 2023. Vol. 10. P. 100–183. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100183>
11. Insights into the Phenol Disinfectant on the Methane Performance from Wastewater by Mesophilic Anaerobic Digestion: Single and two Stages Analysis / H. Xu [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 170. P. 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.089>
12. Сайпуллаев У. М. Средства для обеззараживания ооцит кокцидий птиц // *Ветеринария и кормление*. 2022. № 5. С. 24–26. <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-5-7>
13. Effects of Different Composting Methods on Antibiotic-Resistant Bacteria, Antibiotic Resistance Genes, and Microbial Diversity in Dairy Cattle Manures / M. Tang [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2023. Vol. 106, Issue 1. P. 257–273. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22193>
14. Современные способы обеззараживания органических отходов животноводства / В. Г. Тюрин [и др.] // *Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии*. 2021. № 2 (38). С. 175–182. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202102012>
15. Интенсификация процесса переработки отходов животноводства / К. О. Фирус [и др.] // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 2 (66). С. 65–70. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2021_2_65
16. Application of the Thermophilic Fermentation Method to Obtain Environmentally Friendly Organic Fertilizer / Z. E. Bayazitova [et al.] // *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24. Issue 4. P. 202–216. <https://doi.org/10.12911/22998993/159647>
17. Технология очистки и использования смешанного хозяйственно-бытового и производственного стока в системе производственного водоснабжения / Ю. А. Галкин [и др.] // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2023. № 1. С. 37–41. <https://doi.org/10.35776/VST.2023.01.05>
18. Журавлёв П. В., Алешня В. В., Марченко Б. И. Определение дезинфицирующего действия негашёной извести на микрофлору иловых осадков сточных вод очистных сооружений канализации и животноводческих комплексов // *Гигиена и санитария*. 2019. Т. 98, № 5. С. 483–488. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-dezinfitsiruyushchego-deystviya-negashyonoy-izvesti-na-mikrofloru-ilovyh-osadkov-stochnyh-vod-ochistnyh-sooruzheniy> (дата обращения: 11.08.2023).
19. Примин О. Г. Эффективность и экологическая безопасность обеззараживания воды гипохлоритом // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27, № 4. С. 28–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-28-33>
20. Воздействие импульсным СВЧ излучением на образцы пищевой продукции с целью увеличения показателей ее микробиологической безопасности и сроков хранения / Ю. В. Гуляев [и др.] // *Проблемы особо опасных инфекций*. 2022. № 3. С. 70–74. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-3-70-74>
21. Санитарно-бактериологическое состояние органоминеральных компостов на основе отходов животноводства / В. Г. Тюрин [и др.] // *Ветеринария*. 2022. № 2. С. 41–44. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202104013>
22. Пазова Т. Х., Габаев А. Х. Переработка и утилизация бесподстилочного навоза // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова*. 2022. № 1 (35). С. 116–120. <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-1-35-116-120>

23. Бондаренко А. М., Качанов Л. С. Эффективность технологизации процессов переработки органических отходов животноводства // АПК: Экономика, управление. 2019. № 7. С. 54–61. <https://doi.org/10.33305/197-54>
24. Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстилочного навоза / Н. В. Бышов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 394–412. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.394-412>
25. Ecological and Technological Criteria for the Efficient Utilization of Liquid Manure / N. V. Byshov [et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1>
26. Структурно-информационная модель повышения биотрансформационной интенсивности жидкой фракции свиного бесподстилочного навоза / С. Н. Борычев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 4. С. 28–32. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-4-28-32>
27. Разработка рецептуры антисептиков и дезинфицирующих средств на основе наночастиц серебра / Н. С. Дымникова [и др.] // Российский химический журнал. 2023. Т. 67, № 1. С. 35–42. URL: <http://rcj-isuct.ru/article/view/5045> (дата обращения: 11.08.2023).
28. Нефедова Е. В., Шкиль Н. Н. Влияние наночастиц серебра и дезинфектантов на бактерицидную активность относительно S. Enteritidis // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 11 (217). С. 90–94. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-nanochastits-serebra-i-dezinfektantov-na-bakteritsidnuyu-aktivnost-otnositelno-s-enteritidis> (дата обращения: 11.08.2023).
29. Моделирование эпидемиологических свойств бесподстилочного навоза при подготовке физико-химическим обеззараживанием / А. А. Цымбал [и др.] // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2020. № 3. С. 89–98. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-epidemiologicheskikh-svoystv-bespodstilochnogo-navoza-pri-podgotovke-fiziko-himicheskimi-obezrazhivaniem> (дата обращения: 11.08.2023).
30. Гриднев П. И., Гриднева Т. Т. Результаты исследований процесса обработки навоза крупного рогатого скота в аппаратах вихревого слоя // Техника и оборудование для села. 2021. № 6 (288). С. 29–31. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-6-29-31>
31. Ковалев Д. А., Ковалев А. А. Исследование процесса очистки биогаза от сернистых соединений с использованием аппарата вихревого слоя // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 4 (41). С. 63–67. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-63-67>
32. Селиверстов Г. В., Мотевич С. А., Вобликова Ю. О. Аппарат вихревого слоя в технологии измельчения торфяных грунтов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 391–395. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-7-391-396>
33. Эффективность двухфазного анаэробного сбраживания и физико-химические свойства органической фракции твердых коммунальных отходов, предобработанных в аппарате вихревого слоя / Э. Р. Михеева [др.] // Прикладная биохимия и микробиология. 2020. Т. 56, № 6. С. 619–626. <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>
34. Григорьев В. С., Романов И. В. Применение аппарата вихревого слоя для механического измельчения веществ в водном потоке // Технический сервис машин. 2021. № 2 (143). С. 62–70. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-2-62-70>
35. Лаврентьев А. А., Лимаренко Н. В., Хохлова К. В. Моделирование электромагнитных характеристик индуктора электрического вихревого аппарата в среде ComsolMultiphysics // Известия вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 3. С. 12–17. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2021-3-12-17>
36. Экспериментальное исследование влияния массы рабочих тел на параметры, характеризующие качество функционирования индуктора / Н. В. Лимаренко [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 90–96. <https://doi.org/10.12737/19701>
37. Моделирование влияние влажности бесподстилочного навоза на уровень его санитарно-эпидемиологической нагрузки / С. Н. Борычев [и др.] // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2021. Т. 13, № 2. С. 79–87. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.50.2.011>

38. Pesaran M. H., Smith R. P. Counterfactual Analysis in Macroeconometrics: An Empirical Investigation into the Effects of Quantitative Easing // Research in Economics. 2016. Vol. 70, Issue 2. P. 262–280. <https://doi.org/10.1016/j.rie.2016.01.004>
39. Dettmann E., Giebler A., Weyh A. Flexpanelid: A Stata Toolbox for Causal Analysis with Varying Treatment Time and Duration // SSRN. 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17624.24325>
40. Runhardt R. W. Concrete Counterfactual Tests for Process Tracing: Defending an Interventionist Potential Outcomes Framework // Sociological Methods & Research. 2022. <https://doi.org/10.1177/00491241221134523>

*Поступила в редакцию 24.04.2023; поступила после рецензирования 02.08.2023;
принята к публикации 20.08.2023*

Об авторах:

Лобачевский Яков Петрович, доктор технических наук, профессор, академик-секретарь отделения сельскохозяйственных наук РАН, первый заместитель директора по развитию и инновациям Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>, Researcher ID: H-5863-2018, lobachevsky@yandex.ru

Шемякин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, shem.alex62@yandex.ru

Лимаренко Николай Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), профессор кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, Researcher ID: O-5342-2017, limarenkodstu@yandex.ru

Успенский Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авто-тракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, ivan.uspensckij@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Я. П. Лобачевский – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка цели и задач исследования, формирование частных и общих выводов.

А. В. Шемякин – предоставление исходных данных для создания математической модели, анализ информационных источников.

Н. В. Лимаренко – проведение исследования, подготовка первоначального варианта текста, обработка экспериментальных данных и их контрфактуальный анализ.

И. А. Успенский – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка цели и задач исследования, формирование частных и общих выводов.

И. А. Юхин – проведение анализа информационных источников, обработка изображений, корректировка общих и частных выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Izmaylov A., Briukhanov A., Shalavina E., Vasilev E. Pig Manure Management: A Methodology for Environmentally Friendly Decision-Making. *Animals*. 2022;12(6):747. <https://doi.org/10.3390/ani12060747>
2. Ibragimov A.G., Dzodzieva F.N., Donskaya N.P., Lolaeva B.H., Bolatova L.K. Personal Problems in Russian Digital Agriculture. Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technological Achievements, Digital Ecosystems and Innovative Management of Firms. *Springer International Publishing*. 2023;283–290. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_29
3. Zhong Y., Tang L., Li Y. The Role of Expanding Digital Opportunities in the Development of Environmentally Friendly Production of Farmers Through the Integration of Agrotourism in Xichun, Sichua. *Agricultural Industry*. 2022;12:1761. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111761>
4. Izmailov A.Yu., Dorokhov A.S., Briukhanov A., Popov V.D., Shalavina E.V., Okhtilev M. Yu., Komyslichenko V. N. Digital System of Monitoring and Management of Organic Waste of Animal Husbandry. Lecture Notes on Information Technologies and Communication Technologies. 2022;121:22–33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_3
5. Bryukhanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev Ye.V., Erk A.F. Ecologoenergetic Indicator of the Introduction of the Best Available Technologies for the Disposal of Chicken Manure. *Ecology and Industry of Russia*. 2019;(12):29–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-29-33>
6. Kirilenko V., Dobrokvashina K. Agro-Industrial Complex of Russia: Problems and Prospects. *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022" Global Precision Ag Innovation*. 2023;1071–1078. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_121
7. Trukhachev V.I. Further Directions of Research to Promote Digital Transformation of Agriculture in Russia and Abroad. *Disclosure of Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technological Achievements, Digital Ecosystems and Innovative Management of Firms*. 2023;299–303. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_31
8. He Z., Jia Y., Ji Y. Analysis of Influencing Factors and the Mechanism of Farmers' Behavior in the Field of Environmentally Friendly Production in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(2):961. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020961>
9. Wang B., Dong F., Chen M., Zhu J., Tan J., Fu X., et al. Achievements in the Field of Processing and Utilization of Agricultural Waste in China: Based on Environmental Risks, the Most Important Ways, Influencing Factors, Policy Mechanism. *Procedia Environ*. 2016;31:12–17. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.002>
10. Nicholas H.L., Mabbett I. Drying Milk Manure Using a Passive Solar Installation: A Case Study. *Energy Nexus*. 2023;10:100–183. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100183>
11. Xu H., Wang T., Zhou Y., Shi W., Huang Z., Ruan W. The Effect of Phenolic Disinfectant on the Methane Content in Wastewater During Mesophilic Anaerobic Digestion: Analysis in One and Two Stages. *Safety of Technological Processes and Environmental Protection*. 2023;170:19–27. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.089>
12. Saypullaev U.M. Means for Disinfection of Coccidium Oocysts of Birds. *Veterinary Medicine and Feeding*. 2022;(5):24–26. <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-5-7>
13. Tang M., Wu Z., Li W., Shoaib M., Aqib A.I., Shang R., et al. Effects of Different Composting Methods on Antibiotic-Resistant Bacteria, Antibiotic Resistance Genes, and Microbial Diversity in Dairy Cattle Manures. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(1):257–273. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22193>
14. Tyurin V.G., Mysova G.A., Kochish O.I., Biryukov K.N., Rodionova N.V. Modern Methods of Disinfection of Organic Animal Waste. *Russian Journal Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2021;(2):175–182. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hygy.ecol.202102012>
15. Firus K.O., Anisimova K.V., Glavatskikh N.G., Porobova O.B., Maksimova Ye.V., Spiridonov A.B., et al. Intensification of the Process of Processing Animal Waste. *Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*. 2021;(2):65–70. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.48012/1817-5457_2021_2_65



16. Bayazitova Z.E., Kurmanbayeva A.S., Tleuova Z.O., Temirbekova N.G. Application of the Thermophilic Fermentation Method to Obtain Environmentally Friendly Organic Fertilizer. *Journal of Ecological Engineering*. 2023;24(4):202–216. <https://doi.org/10.12911/22998993/159647>
17. Galkin Yu.A., Baskov Ye.M., Ulasovets Ye.A., Obadin D.N., Ermakov D.V., Knaub E.A. Technology of Purification and Use of Mixed Household and Industrial Runoff in the Industrial Water Supply System. *Water Supply and Sanitary Equipment*. 2023;(1):37–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35776/VST.2023.01.05>
18. Zhuravlev P.V., Alyoshnya V.V., Marchenko B.I. Determination of the Disinfecting Effect of Quicklime on the Microflora of Sludge from Sewage Treatment Plants and Livestock Complexes. *Hygiene and Sanitation*. 2019;98(5):483–488. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-dezinfitsiruyuschego-deystviya-negashyonoy-izvesti-na-mikrofloru-ilovyh-osadkov-stochnyh-vod-ochistnyh-sooruzheniy> (accessed 11.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Primin O.G. Efficiency and Environmental Safety of Water Disinfection with Hypochlorite. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(4):28–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-28-33>
20. Gulyaev Yu.V., Meshchanov V.P., Kats B.M., Koplevsky N.A., Lopatin A.A., Sayapin K.A., et al. Exposure of Food Samples to Pulsed Microwave Radiation to Increase their Microbiological Safety and Shelf Life. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2022;(3):70–74. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-3-70-74>
21. Tyurin V.G., Mysova G.A., Potemkina N.N., Sakharov A.Yu., Kochish O.I., Biryukov K.N. Sanitary-Bacteriological State of Organomineral Compost Based on Animal Husbandry Waste. *Veterinary Medicine*. 2022;(2):41–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202104013>
22. Pazova T.Kh., Gabaev A.Kh. Processing and Utilization of Unlited Manure. *Proceedings of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;(1):116–120. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-1-35-116-120>
23. Bondarenko A.M., Kachanov L.S. Efficiency of Technologization of Processes of Processing of Organic Waste of Animal Husbandry. *Agroindustrial Complex: Economics, Management*. 2019;(7):54–61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33305/197-54>
24. Byshov N., Uspenskiy I., Yukhin I., Chatkin M., Limarenko N. Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):394–412. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.394-412>
25. Byshov N.V., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Limarenko N.V. Ecological and Technological Criteria for Effective Utilization of Liquid Manure. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012069>
26. Borychev S.N., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Limarenko N.V., Fomin S.D., Mishurov N.P. Structural and Informational Model of Increasing the Biotransformation Intensity of the Liquid Fraction of Pork Liquid Manure. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021;(4):28–32. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-4-28-32>
27. Dymnikova N., Yerokhina Ye., Moryganov A., Kuznetsov O. Formulation Development of Antiseptics and Disinfectants Based on Silver Nanoparticles. *Russian Chemical Journal*. 2023;67(1):35–42. Available at: <http://rcj-isuct.ru/article/view/5045> (accessed 11.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
28. Nefedova Ye.V., Shkil N.N. Influence of Silver Nanoparticles and Disinfectants on Bactericidal Activity Relative to S. Enteritidis. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;(11):90–94. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-217-11-90-94>
29. Tsymbal A.A., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Limarenko N.V. Modeling of the Epidemiological Properties of Liquid Manure During Its Preparation by Physico-Chemical Disinfection. *Bulletin of the Ryazan Agrotechnological University*. 2020;(3):89–98. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-epidemiologicheskikh-svoystv-bespodstilochnogo-navoza-pri-podgotovke-fiziko-himicheskim-obezzarazhivaniem> (accessed 11.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
30. Gridnev P.I., Gridneva T.T. Results of Research on the Processing of Cattle Manure in Vortex Layer Apparatuses. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021;(6):29–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-6-29-31>

31. Kovalev D.A., Kovalev A.A. Investigation of the Biogas Purification Process from Sulfur Compounds Using a Vortex Layer Apparatus. *Electrotechnologies and Electrical Equipment in the Agroindustrial Complex*. 2020;67(4):63–67. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-63-67>
32. Seliverstov G.V., Motevich S.A., Voblikova Yu.O. The Apparatus of the Vortex Layer in the Technology of Grinding Peat Soils. *News of Tula State University. Technical Sciences*. 2022;(7):391–395. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-7-391-396>
33. Mikheeva E.R., Katraeva I.V., Vorozhtsov D.L. Efficiency of Two-Phase Anaerobic Digestion and Physico-Chemical Properties of Organic Fraction of Municipal Solid Waste Pretreated in the Vortex Layer Apparatus. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2020;56(6):619–626. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>
34. Grigoriev V.S., Romanov I.V. Application of the Vortex Layer Apparatus for Mechanical Grinding of Substances in a Water Stream. *Technical Service of Machines*. 2021;2:62–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-2-62-70>
35. Lavrentiev A.A., Limarenko N.V., Khokhlova K.V. Modeling of Electromagnetic Characteristics of an Inductor of an Electric Vortex Apparatus in the Medium of ComsolMultiphysics. *University News. Electromechanics*. 2021;64(3):12–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2021-3-12-17>
36. Limarenko N.V., Zharov V.P., Panov Y.V., Shapoval B.G. Experimental Study of the Influence of the Mass of Working Bodies on the Parameters Characterizing the Quality of Inductor Functioning. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2016;16–2(85):90–96. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/19701>
37. Borychev S.N., Limarenko N.V., Rakyl E.A., Yukhin I.A. Modeling the Influence of Moisture of Liquid Manure on the Level of Its Sanitary and Epidemiological Load. *Bulletin of the Ryazan Agrotechnological University*. 2021;13(2):79–87. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.50.2.011>
38. Pesaran M.H., Smith R.P. Counterfactual Analysis in Macroeconomics: An Empirical Study of the Effects of Quantitative Easing. *Research in Economics*. 2016;70(2):262–280. <https://doi.org/10.1016/j.rie.2016.01.004>
39. Dettmann E., Gibler A., Weich A. Flexpanelddid: A Stata Toolbox for Causal Analysis with Varying Treatment Time and Duration. *SSRN*. 2020. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17624.24325>
40. Runhardt R. Defending an Interventionist Potential Outcomes Framework. Concrete Counterfactual Tests for Processes Tracking. *Sociological Methods and Research*. 2022. <https://doi.org/10.1177/00491241221134523>

Submitted 24.04.2023; revised 02.08.2023; accepted 20.08.2023

About authors:

Yakov P. Lobachevsky, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, First Deputy Director for Development and Innovation, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutskiy Pereulok, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>, Researcher ID: H-5863-2018, lobachevsky@yandex.ru

Alexander V. Shemyakin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Rector of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, shem.alex62@yandex.ru

Nikolay V. Limarenko, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technical Operation of Transport of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), Professor of the Chair of Instrumentation and Biomedical Engineering of the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, Researcher ID: O-5342-2017, limarenkodstu@yandex.ru



Ivan A. Uspensky, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: B-7990-2019, ivan.uspensckij@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Automotive Engineering and Thermal Power Engineering of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, ivan.uspensckij@yandex.ru

Authors contribution:

Ya. P. Lobachevsky – scientific guidance, formulating the basic concept of research, setting goals and objectives of research, formulating particular and general conclusions.

A. V. Shemyakin – providing initial data for creating a mathematical model, analyzing information sources.

N. V. Limarenko – conducting research, preparing the initial version of the text, processing experimental data and the counterfactual analysis of them.

I. A. Uspensky – scientific guidance, formulating the basic concept of research, setting goals and objectives of research, formulating particular and general conclusions.

I. A. Yukhin – analyzing information sources, processing images, correcting general and particular conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.



Закономерности влияния густоты посева озимой пшеницы на ее урожайность

М. Е. Чаплыгин ✉, **Э. В. Жалнин**, **Л. С. Шибряева**,
А. В. Подзоров
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)
✉ misha2728@yandex.ru

Аннотация

Введение. В статье рассматриваются морфологические особенности почвы и сортовые особенности зерна как главные факторы, от которых зависит динамика прорастания озимой пшеницы от проростков до созревания зерна.

Цель статьи. Установление основных закономерностей развития растений в зависимости от внутренних и внешних факторов, влияющих на урожайность озимой пшеницы.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была взята озимая пшеница сорта РС-1 «Таня». Посев производили на производственных площадях Северо-Кавказского федерального округа. Размер площади составил 70 га, было заложено 2 опыта с разной нормой высева. Достоверность результатов проверялась по коэффициенту Фишера и Стьюдента. Наблюдения проводили за полным циклом роста растений – от проростков до полного созревания зерна.

Результаты исследования. Сопоставлена динамика изменения морфологических параметров растений, проросших из семян при разных нормах высева 2,6 и 6,5 млн шт/га. Проведен анализ роли внешних и внутренних факторов, определяющих зависимость урожайности пшеницы от нормы высева семян. К внешним относили факторы среды роста, определяющие жизнеспособность растений и связывающие ее с плотностью посева. При этом были рассмотрены физико-химические свойства почвы, включая ее плодородие с показателями емкости (количество минеральных веществ и их фракционный состав), прочность связи минеральных веществ с твердой фазой почвы и скорость перехода почвенных ионов из твердой фазы в водный раствор. При исследовании почвы, подготовленной по предлагаемой технологии возделывания, было установлено, что при норме высева 6,5 млн шт/га количество продуктивных стеблей составило 550 шт. (0,0575 ед/кг стеблей), в то время как на площади при норме высева 2,6 млн шт/га количество таких стеблей составило 575 шт. (0,183 ед/кг стеблей).

Обсуждение и заключение. Проведена оценка влияния плотности высева семян пшеницы на урожайность с использованием уравнения Гарднера и параметров сорбционных свойств корневых систем пшеницы. Показано, что для плотности посева пшеницы при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га соотношение между значениями коэффициентов диффузии $D(6,5)/D(2,6)$, полученными с учетом выросших стеблей, составило ~1,7 раза. Было показано, что определяющим фактором является структура почвы, которая определяет параметры водопроводности. Вид формирующейся корневой системы определяется скоростью поглощения воды и глубиной, с которой вода извлекается из почвы в расчете на одно растение. К факторам, определяющим влияние плотности посева на урожайность, относятся осмотические параметры мембран в клетках семян. Накопление в клетке пролина как осмотически активного органического вещества способствует удержанию в ней воды. Обработка

© Чаплыгин М. Е., Жалнин Э. В., Шибряева Л. С., Подзоров А. В., 2023



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

микроэлементами и регуляторами роста семян, проросших при разных нормах высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, приводит к большему росту концентрации пролина в цитоплазме в первом случае, чем во втором.

Ключевые слова: озимая пшеница, норма высева, корневая система озимой пшеницы, факторы урожайности пшеницы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств гранта по соглашению № 075-15-2022-1210 от 07.10.2022 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта по теме «Разработка технологии и оборудования для улучшения продуктивных свойств семян зерновых культур путем электромагнитного воздействия».

Для цитирования: Закономерности влияния густоты посева озимой пшеницы на ее урожайность / М. Е. Чаплыгин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 490–507. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.490-507>

Original article

Patterns of Influence of Winter Wheat Sowing Density on Its Yield

M. E. Chaplygin , E. V. Zhalnin, L. S. Shibryaeva, A. V. Podzorov

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)*

 misha2728@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article deals with the soil morphological features and grain varietal characteristics as the main factors on which the dynamics of the winter wheat development from seedlings to full grain ripeness depends.

Aim of the Article. The article is aimed at determining the main patterns of plant development depending on internal and external factors affecting the winter wheat yield.

Materials and Methods. The winter wheat variety RS-1 “Tanya” was an object of the research. Sowing was carried out in the production zones of the North Caucasus Federal District. The size of the area amounted to 70 ha; there were two experiments with different seeding rates. The reliability of the results was checked using Fisher's and Student's coefficient. There were carried out monitoring of the complete cycle of plant development - from seedlings to full grain ripeness.

Results. The dynamics of changes in morphological parameters of plants germinated from seeds at seeding rates of 2.6 and 6.5 million pieces/ha was compared. The role of external and internal factors determining the dependence of wheat yield on seeding rate was analyzed. The external factors included the growth environment factors determining the health of plants and relating growth environment to the sowing density. At the same time, there were considered physico-chemical properties of soil including its fertility with capacity index (the amount of mineral substances and their fractional composition), the strength of the bond between mineral substances and the matrix soil, and the rate of transition of soil ions from the matrix soil to aqueous solution. When analyzing the soil prepared by the proposed cultivation technology, it was found that at a seeding rate of 6.5 million pieces/ha the number of productive stems was 550 pieces (0.0575 pieces/kg of stems), and at a seeding rate of 2.6 million pieces/ha their number was 575 pieces (0.183 pieces/kg of stems).

Discussion and Conclusion. The influence of wheat seed sowing density on yield was evaluated using the Gardner equation and parameters of sorption properties of wheat root systems. It was shown that for wheat sowing density at seeding rates of 2.6 and 6.5 million pieces/ha the ratio between the values of diffusion coefficients $D(6.5)/D(2.6)$, obtained taking into account the grown stems, was ~ 1.7 times. It was found that the determining

factor is the soil structure, on which the parameters of water supply depend. The type of developing root system is determined by the water absorption rate and the depth to which water is extracted from the soil per plant. The factors determining the effect of seeding density on yield include osmotic parameters of seed cell membranes. Accumulation of proline as an osmotically active organic matter in the cell promotes water retention in the cell. The use of microelements and growth regulators for treating seeds germinated at sowing rates of 2.6 and 6.5 million pieces/ha leads to a greater increase in the proline concentration in the cytoplasm in the first case than in the second.

Keywords: winter wheat, seeding rate, winter wheat root system, wheat yield factors

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

Funding: The work was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: Agreement No. 075-15-2022-1210 of October 7, 2022 "Development of technology and equipment for improving the productive properties of grain seeds by electromagnetic influence".

For citation: Chaplygin M.E., Zhalnin E.V., Shibryaeva L.S., Podzorov A.V. Patterns of Influence of Winter Wheat Sowing Density on Its Yield. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):490–507. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.490-507>

Введение

Важнейшей стратегической задачей в области агропромышленного комплекса является поиск новых инновационных технологий, направленных на улучшение качества выращиваемых культур и повышение урожайности. Эта задача требует использования научных подходов для разработки новых методов улучшения условий развития растений [1–4]. В настоящее время основным резервом, позволяющим решить проблему повышения урожайности сельскохозяйственных культур, является использование адаптивных агротехнологий, обеспечивающих взаимосвязанное решение следующих вопросов: размещение посевов¹ [4], использование высокопродуктивных районированных сортов [3], своевременное и качественное внедрение всех технологических приемов, основанных на комплексной механизации производства и рациональной организации труда [4; 5].

Обзор литературы

Предпосылки для использования принятой технологии появились в результате исследований, проведенных в последние годы [3; 6]. За это время сорта, их урожайность и даже климатические условия значительно изменились как в Российской Федерации, так и за границей [7–9]. Прежде всего, были получены достоверные результаты, свидетельствующие о возможности изменения нормы высева зерновых культур без ущерба для урожайности [10–14]. Было продемонстрировано, что разумное и рациональное снижение нормы высева семян может повысить эффективность возделывания сельскохозяйственных культур благодаря снижению затрат на посадочный материал и ряду факторов, способствующих повышению урожайности. Например, за счет увеличения размеров корневой системы, уменьшения полегания растений, улучшения фитосанитарного состояния сельскохозяйственных культур и т. д. [10–14]. Результаты исследований по возделыванию зерновых культур, проведенных во многих странах Западной Европы, в Беларуси, Казахстане, Киргизии, Бурятии, Российской Федерации подтверждают, что важной проблемой является определение взаимосвязи между урожайностью и технологией высадки семян

¹ Чекмарев П. А., Васенев И. И., Гогмачадзе Г. Д. Агроэкологическая оценка земель и оптимизация землепользования. М. : Издательство Московского университета, 2012. 268 с.

в почву [10–12]. Важным вопросом является взаимосвязь между технологическими приемами посадки культур и их сортовыми качествами. На первое место выдвигается вопрос индивидуальной продуктивности каждого растения в зависимости от вида, сорта, нормы высева, при этом рассматривается критическое расстояние между растениями в ряду в зависимости от состояния почвы [10–14]. Однако для научного подхода к внедрению технологии, определяющей возможность повышения урожайности сельскохозяйственных культур, основанной на варьировании нормы высева, требуется установить факторы роста, заложенные в сортовых особенностях и в строении растения [14–15].

Материалы и методы

Эксперименты проводились на производственных посевных площадях Северо-Кавказского округа на посевах озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня».

На поле после уборки предшественника кукурузы на зерно площадью 70 га была подготовлена почва для посева озимой пшеницы по следующей технологии:

- дискование в два прохода агрегата МТЗ-1523 + БДМ-4х2 «Кортес 4»;
- внесение основного удобрения Аммофос 150 кг/га МТЗ-82 + ЗА-М-900;
- закрытие удобрений МТЗ-1221 + БДТМ-3П-3А;
- предпосевная обработка почвы МТЗ-1221 + КП-8;
- посев МТЗ-82 + СЗТ – 5,4 и МТЗ-82 + С-6ПМ («быстрица»);
- прикатывание посевов МТЗ-82 + ЗККШ-6.

Агрохимический анализ обеспеченности почвы опытных участков элементами питания проведен согласно методике, изложенной в «Общесоюзной инструкции по крупномасштабным почвенным и агрохимическим исследованиям». Каждый смешанный образец составлен из 20 индивидуальных проб, отобранных буром с 10 га участка прямым маршрутным способом на глубину пахотного слоя (0–30 см). Анализы почвенных проб выполнены следующими методами:

- гумус – по методу Тюрина, по ГОСТ 26213;
- подвижный фосфор и обменный калий – по методу Мачигина согласно ГОСТ 26205;
- нитрификационная способность почв – по методу Кравкова согласно ГОСТ 26951;
- кислотность почвы pH (КН1) согласно ГОСТ 26483;
- подвижная сера по методу ЦИНАО согласно ГОСТ 26490;
- подвижный марганец, цинк, кобальт и медь – согласно ГОСТ Р 50685, ГОСТ Р 50686, ГОСТ Р 50683;
- тяжелые металлы – в соответствии с рассмотренным методом²;
- остаточные количества пестицидов – по методу, описанному в работе М. А. Клисенко³.

Агрохимическую характеристику почв опытного поля проводили по следующим показателям: содержание гумуса, нитрифицирующая способность почв, подвижные формы фосфора, калия, микроэлементов, тяжелых металлов и реакция почвенного раствора (табл. 1).

Результаты исследования

С целью анализа внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на урожайность, использовали посадки с различной густотой посева озимой пшеницы. Для этого на поле площадью 40 га был проведен посев озимой пшеницы сорта

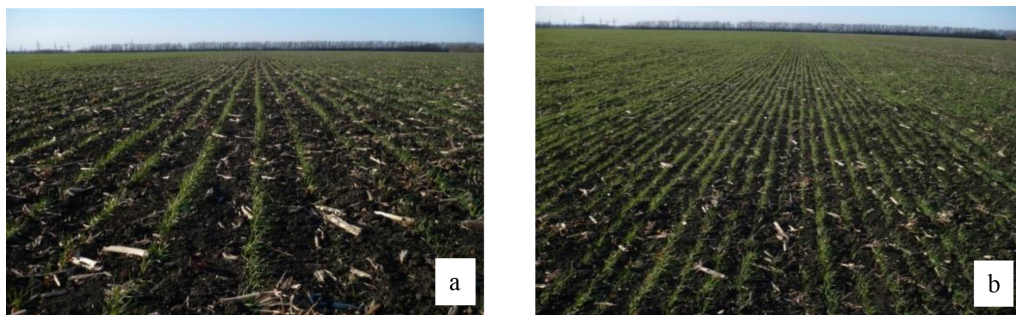
² Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодия и продукция растениеводства / Под ред. А. М. Артюшина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : ЦИНАО, 1992. 63 с.

³ Клисенко М. А. Методы определения микроколичеств пестицидов в почве, продуктах питания и внешней среде. М. : Колос, 1992. 304 с.

РС-1 «Таня» с нормой высева 6,5 млн шт/га, на другом участке площадью 30 га был проведен посев с уменьшенной нормой высева 2,6 млн шт/га.

Влияние разной нормы высева было исследовано в условиях подготовки агрохимических характеристик оптимальных для роста растений почв.

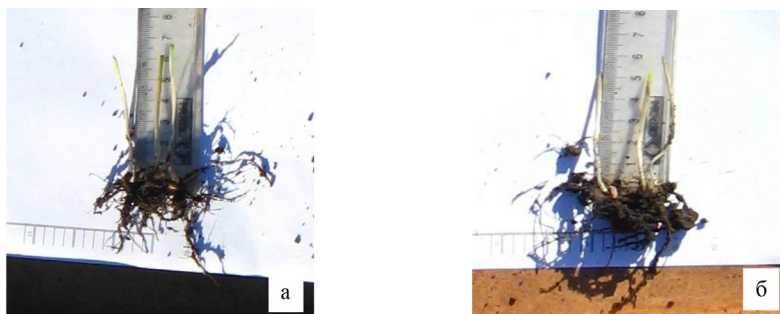
Агрохимическую характеристику почв опытного поля проводили по следующим показателям: содержание гумуса, нитрифицирующая способность почв, подвижные формы фосфора и калия, микроэлементы, тяжелые металлы и реакция почвенного раствора (табл. 1). Из агрохимических характеристик почв опытного поля, составленных на основе данных анализа почвы, видно, что почва опытного участка имеет среднее содержание гумуса, повышенную и высокую способность к нитрификации, очень низкое содержание фосфора и большое содержание калия. Реакция почвы рН-нейтральная. Запасы серы, марганца, цинка и меди невелики. Содержание тяжелых металлов не превышает предельно допустимой концентрации (ПДК). Наблюдение за прорастанием растений показало (рис. 1), что начало кущения на участке с нормой высева 2,6 млн шт/га произошло на 2 недели раньше, чем на участке с нормой высева 6,5 млн шт/га.



Р и с. 1. Посевы озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 1. Winter wheat crops of the “Tanya” RS-1 variety with the seeding rate 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

Корневая система озимой пшеницы была волокнистой и при норме высева 2,6 млн шт/га стала более мощной и развитой (рис. 2).



Р и с. 2. Состояние корневой системы растений озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 2. The condition of the root system of winter wheat plants of the “Tanya” RS-1 variety with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

При этом растения имели заметно более толстый стебель и более крупные листья (рис. 3).



Р и с. 3. Состояние корневой системы растений озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» перед фазой зимнего роста с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 3. Condition of the root system of winter wheat plants of the “Tanya” RS-1 variety before the winter growth phase with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

Таким образом, на зиму растения уходят с хорошо развитой корневой системой. В то же время на площади с нормой высева 2,6 млн шт/га всходы пшеницы находились в начале кущения. Растения хорошо перезимовали (рис. 4).

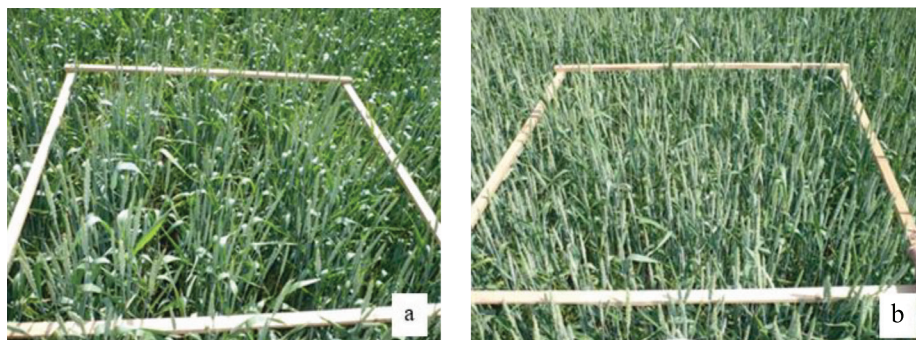


Р и с. 4. Состояние корневой системы растений озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» весной с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 4. Condition of the root system of winter wheat plants of the “Tanya” RS-1 variety in spring with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

В начале марта была проведена первая подкормка аммиачной селитрой из расчета 150 кг/га. Через три недели была проведена вторая подкормка аммиачной селитрой из расчета 100 кг/га. В начале апреля для борьбы с сорняками и болезнями посевы были обработаны препаратами Турбо (0,1 л/га) и Зим-500 (0,6 л/га) соответственно. Также была проведена внекорневая подкормка гуматом калия (0,5 л/га).

Проведенными исследованиями было установлено, что при низких нормах высева озимая пшеница интенсивно кустится. На загущенных посевах в результате недостаточного освещения на заключительных стадиях органогенеза отмирает значительная часть побегов и целых растений, а у тех, которые сохраняются, развитие несколько задерживается (рис. 5).



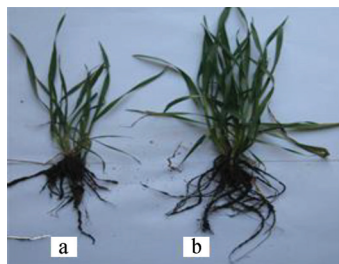
Р и с. 5. Состояние посевов озимой пшеницы РС-1 «Таня» с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 5. Condition of winter wheat crops of the “Tanya” RS-1 variety with a sowing rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

Недостаток света является основной причиной низкого коэффициента продуктивного кушения культур с высокой нормой высева. При его отсутствии наблюдается углеводное голодание растений, задерживается образование новых побегов, и в то же время тормозится регенерация узловых корней, от степени развития которых, в свою очередь, зависит энергия кушения. Наблюдениями доказано, что побеги, которые своевременно не образуют корней, рано отмирают. Лабораторные исследования показали, что продуктивными являются те побеги, которые синхронно формируются осенью и не повреждаются зимой.

Всходы, которые появляются позже, представляют собой выжимку, образующую в колосе несколько недоразвитых зерен, либо выжимку, неспособную образовывать колосья. Для нормального роста и развития растениям озимой пшеницы требуется соответствующая зона подкормки, в которой они могут получать достаточное количество влаги и питательных веществ, чтобы реализовать свою потенциальную продуктивность.

Была установлена ведущая роль процесса формирования корневой системы. Там, где норма высева составляла 2,6 млн шт/га, корневая система была более развитой, корни расходились во всех направлениях вниз и обеспечивали достаточное питание растений. При плотности посева 6,5 млн шт/га происходила внутривидовая борьба за водоснабжение, при этом корневая система была менее развитая, корни в основном росли вниз (рис. 6).



Р и с. 6. Корневая система пшеницы РС-1 «Таня», выращенной из посадок с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 6. The root system of “Tanya” RS-1 variety, grown from plantings with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

При более низких нормах высева увеличение урожайности обычно объясняется уменьшением полегания и внутривидовой борьбы между растениями, увеличением размеров корневой системы, полевой всхожести, зимостойкости и выживаемости, улучшением индивидуального развития каждого растения и фитосанитарного состояния посевов. Однако эти концепции основаны на определенных механизмах биологической адаптации пшеницы и факторах, с помощью которых нормы высева могут контролировать развитие растений и, следовательно, их урожайность.

Можно выделить несколько групп биологических факторов, которые связывают рост и развитие растений с плотностью высева их семян.

Очевидно, что в первую очередь это факторы окружающей среды: качество почвы, в которой прорастают семена, содержание минеральных веществ, водный режим, активность фотосинтетического аппарата. Условно эти факторы можно отнести к факторам внешней среды. С другой стороны, это набор биологических адаптаций, присущих семенам сельскохозяйственных культур под влиянием условий развития, которые складываются в эколого-ценотическую стратегию вида, позволяющую ему адаптироваться к этим условиям. Это внутренние факторы, которые обусловлены специфическими характеристиками растения. Среди физиологических процессов, определяющих развитие и выживание растений в любых условиях, стоит отметить поглощение воды и растворимых в ней минералов. Более того, развитие растений в гораздо большей степени зависит от водного обмена растений, наличия воды, которая определяет водный режим растительных клеток и растительных тканей. В свою очередь, доступность воды для растения зависит от интенсивности притока воды из почвы к поверхности корней, способности растения поглощать воду на этой поверхности, передавать воду стеблям и листьям и потреблять ее за счет транспирации листьев. В регуляции внутреннего водного обмена в растениях значительная роль принадлежит их водоудерживающим силам, которые в основном обусловлены содержанием осмотически активных веществ в клетках и способностью коллоидов набухать⁴.

Внешние факторы. К внешним факторам относятся факторы среды роста. Первым основным фактором, определяющим жизнеспособность растений и связывающим ее с плотностью посева, является почва с ее физико-химическими свойствами, плодородие с показателями емкости (количество минеральных веществ и их фракционный состав), интенсивности (прочность связи веществ с твердой фазой) и кинетики (скорость перехода ионов из твердой фазы в водный раствор). Эти характеристики почвы определяют состояние воды, минеральных солей, ионных соединений в почве и, как следствие, сорбционные свойства корневых систем растений. Поскольку на участке с нормой высева 2,6 млн шт/га начало кущения произошло на 2 недели раньше, чем в случае с нормой высева 6,5 млн шт/га, зимой растения вышли с хорошо развитой корневой системой, более мощными стеблями, чем при плотности высева 6,5 млн шт/га. Эти факты могут быть связаны с улучшенным обеспечением водой редко высаживаемых растений.

Влияние плотности посева на жизнеспособность растений связано с влагоудерживающей способностью клеток, из которых состоят органы растения. В свою очередь, влагоудерживающая способность ячеек связана с содержанием влаги,

⁴ Ахмедов А. Д. Аналитический подход к определению некоторых водно-физических характеристик почв // Мат. Междунар. науч.-практ. конф. «Роль мелиорации и управления водными ресурсами в реализации национальных проектов». М. : МГУП, 2008. С. 1–7.

влагоудерживающей способностью и водопроводностью почвы. Содержание влаги в почве определяется диффузионным потоком, который может создаваться за счет дождевой воды или искусственного орошения. Коэффициент влагопроводности почвы является показателем поступления воды в корневую систему растения. Таким образом, если коэффициент диффузии влаги в почве и коэффициент влагопроводности определяют скорость подачи воды к прорастающим семенам, а затем к корням растений, то плотность заделки семян пшеницы в почву определяет количество влаги, которое должно быть передано из почвы каждому отдельному зародышу. Для оценки диффузионных параметров и влагопроводности почвы необходимо подавать такое количество воды, чтобы обеспечить прорастание семян при выбранной плотности высева. Были использованы модели переноса влаги в почве при подпочвенном орошении.

Была использована методика определения капиллярного давления и максимальной молекулярной влагоемкости на основе водно-физических свойств почвы. Методика основана на теоретической модели, связывающей закон движения жидкости в капиллярно-пористых телах и описывающей зависимость, позволяющую определять влагопроводность на основе основной гидрофизической характеристики почвы – ее плотности⁵ [22].

Для проведения оценок использовалась полуэмпирическая модель [19], которая описывает зависимость коэффициента влагопроводности $K(W)$ от степени влагонасыщенности почвы степенной функцией с помощью соотношения (1):

$$K(W) = K_D \left[\frac{W - W^*}{m - W^*} \right]^n, \quad (1)$$

где K_ϕ – коэффициент фильтрации; m – пористость почвы; W^* – связанная влага, при которой начинается интенсивный перенос воды в жидкую фазу; n – показатель, зависящий от гигроскопичности.

Учитывая, что при норме высева 6,5 млн шт/га количество продуктивных стеблей составило 550 шт. (0,0575 ед/кг стеблей), в то время как на площади при норме высева 2,6 млн шт/га количество таких стеблей составило 575 шт. (0,183 ед/кг стеблей), начальная влажность на единицу растения при плотной посадке семян до 3 раз меньше, чем при редкой. Однако по мере поглощения корнями растений влаги из почвы водопроницаемость уменьшается. Для установления взаимосвязи между коэффициентом диффузии и влагопроводностью в зависимости от влажности почвы был использован коэффициент Гарднера [20]:

$$D(W) = D_0 \exp[\beta(W - W_0)]. \quad (2)$$

где β – параметр, характеризующий почву, D_0 – коэффициент диффузии почвы при начальной влажности W_0 .

С использованием зависимости (2) была проведена оценка влияния плотности посева пшеницы на норму расхода влаги при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га. Соотношение между значениями $D(6,5)/D(2,6)$, полученными с учетом выросших

⁵ Козловский Т. Водообмен растений. М. : Колос, 1969. 99 с.; Савич В. И., Сычев В. Г., Трубицина Е. В. Химический автограф системы почва-растение. М. : ЦИНАО, 2001. С. 13; Слейтер Р. О. Водный режим растений / Под ред. А. И. Будаговского. Пер. с англ. В. Д. Утехина. М. : Мир, 1970. 365 с.

стеблей, составило $\sim 1,7$ раза. Влияние плотности высева семян пшеницы на потенциальный урожай можно оценить по параметрам сорбционных свойств корневых систем пшеницы с помощью соотношения (3) [21]:

$$Y, \frac{\text{ц}}{\text{га}} = k \left(\sum \frac{Q}{q} \right) \eta K_m K_1 K_2, \quad (3)$$

где Q – фотосинтетически активное излучение; k – коэффициент эффективности поглощения излучения; q – расход энергии на 1 центнер продукта; η – эффективность использования (фотосинтетически активной радиации (ФАР)); K_m – коэффициент, показывающий долю основных продуктов; K_1 – коэффициент, учитывающий потребление энергии из-за свойств почвы и количества подвижных питательных веществ и воды; K_2 – коэффициент, учитывающий сорбционные свойства корней в течение вегетационного периода.

При норме высева 6,5 млн шт/га $Y = 0,0575$ ед/кг, при 2,6 млн шт/га $Y = 0,183$ ед/кг.

Если предположить, что плотность высева не влияет на условия роста семян, а основные параметры соотношения (3) имеют одинаковые значения, за исключением параметров сорбционных свойств корневых систем пшеницы, при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, из соотношения (3) мы можем оценить соотношение между коэффициентами $K_2(2,6) / K_2(6,5) = \sim 3,1$.

Таким образом, поступление воды в растение является количественной функцией ее содержания в свободной форме в почве, свойств почвы и сорбционных свойств корней.

Скорость поглощения воды и глубина, на которой вода извлекается из почвы, сильно различаются в зависимости от характера корневой системы растения.

Это различие отражает различия в глубине распространения и количестве корней при разной плотности посева. Адекватное водопоглощение связано с образованием довольно широко распространенных корневых систем. Самое быстрое поглощение воды происходит в области корневых волосков. Это подтверждается данными на рисунке 4 и значением отношения $K_2(2,6) / K_2(6,5) = 3,1$, полученным для посева пшеницы с нормой высева 2,6 и 6,5 млн шт/га. Способность растения образовывать корневые волоски является важной чертой, которая влияет на скорость потребления воды растениями. Плотность посева изменяет форму и параметры корней растений. Разные размеры корней определяют различия в глубине распределения и количестве корней пшеницы. При высокой плотности посева образуются более мелкие корни, погруженные на меньшую глубину, отсюда и более низкое значение K_2 . На развитие корней значительное влияние оказывала конкуренция между насаждениями. Важно отметить, что для посева озимой пшеницы использовалась технология подготовки почвы, которая обеспечивает высокие показатели диффузии и влагопроводности.

Рост продуктивности растений – это интегральный показатель, характеризующий устойчивость растений ко всем стрессовым воздействиям.

Помимо недостатка воды стресс растений может вызвать засоление почвы. Однако засоление почвы подавляет рост побегов больше, чем корней, в результате чего отношение массы корней к массе побегов увеличивается, а в нашем случае это соотношение не меняется, что указывает на отсутствие засоления почвы как влияющего фактора. Также на отсутствие засоления почвы указывает анализ состава минеральных веществ, внесенных в почву (табл. 1). Тот факт, что технология внесения минеральных веществ была одинаковой для участков с разной нормой

высева (табл. 1), позволяет в первом приближении исключить их из основных факторов влияния и рассматривать как фактор, являющийся функцией скорости подачи воды из почвы в почву. Причиной низкого коэффициента продуктивного кушения растений при высокой норме высева может быть недостаток света.

При отсутствии света у растений наблюдается углеводное голодание, задерживается образование новых побегов, и в то же время тормозится регенерация узловых корней, от степени развития которых зависит энергия кушения. Побеги, которые своевременно не образуют своих корней, рано отмирают. К периоду сбора урожая на единицу площади, при разных нормах высева и благоприятных условиях, количество стеблей часто становится одинаковым. Однако в нашем случае количество выросших стеблей на единицу посадочного материала у пшеницы с низкой нормой высева заметно выше.

Внутренние факторы. Наличие водного потока в почве еще не может обеспечить влагой корневую систему и растение в целом без участия внутренних всасывающих сил. Таким образом, наиболее важной является влагопроводность воды, текущей вверх от корня по внутренним капиллярам растения к стеблям и листьям. Всасывающее действие развивающейся корневой системы может обеспечить осмотическое давление в клетках растения. Доминирующую роль в регуляции поглощения играет сопротивление переносу почвенной влаги внутри растения, связанное с осмотическими явлениями и давлением тургора, т. е. явлениями, особенность которых обусловлена клеточной структурой. В этом случае большое значение имеет геном растения. Корневая система озимой пшеницы волокнистая, с большим количеством тонких ветвящихся корней, покрытых тонкими корневыми волосками (рис. 2–5).

В то же время пшеница с нормой высева 2,6 млн шт/га развивает более мощную и крупную корневую систему (рис. 6) и более высокую урожайность (рис. 5). Большее количество вторичных корней обеспечивает значительно большую всасывающую поверхность на единицу объема почвы (рис. 6). Высокая концентрация посадок, например 6,5 млн шт/га, приводит к уменьшению массы корневой системы (рис. 2–4; 6) для каждого растения из-за конкуренции между посадками за площадь орошаемой почвы. Влажность почвы оказывает значительное влияние на продолжительность роста площади листьев.

Фактором, который чаще всего снижает урожайность растений, является недостаточный рост площади листа и его ограниченный размер. Плотность растений оказывает важное влияние. Более загущенные культуры с тем же режимом увлажнения почвы заканчивают рост листовой несколько раньше, особенно в период цветения. В густо растущих насаждениях площадь листьев уменьшается, в то время как в более редких посадках площадь листьев продолжает расти (рис. 6). Плотность посева определяет влагоудерживающую способность клеток, которая зависит от сортовых особенностей. Осмотические факторы относятся к числу морфологических факторов, определяющих влияние плотности посева на урожайность [15].

Характеристики растений, обусловленные водопоглощением, участвующим в засухоустойчивости, включают способность поддерживать гидратацию растений посредством осмотической регуляции, а также накопление определенных специфических защитных веществ, таких как пролин, сахараиды и белки из семейства дегидринов, которые поддерживают тургор и более высокое относительное содержание воды в растении и листьях. Важно отметить, что уровень гидратации тканей растений, выращенных на участках с низкой нормой высева (100 кг/га),

остается высоким в течение длительного времени. Согласно исследованию [16], различия в плотности посева могут влиять на осмотическую адаптацию и коррелировать с различиями в жизнедеятельности растений пшеницы. Более того, пролин является ключевым осмотически активным веществом, которое может служить индикатором того, что молекула участвует в процессах адаптации. Мы статьи провели исследования по влиянию регулятора роста мелафена на засухоустойчивость пшеницы. В качестве показателя была взята степень накопления свободного пролина. Это вещество обладает защитными свойствами со способностью накапливаться в значительных количествах в растениях при экстремально высоких температурах, сопровождающихся дефицитом воды [17]. Согласно литературным данным, при дефиците воды у ряда растений (пшеницы, ячменя, шпината и др.) концентрация пролина в цитоплазме увеличивается в 100 раз и более [18]. Благодаря своим гидрофильным группам пролин может образовывать агрегаты, которые ведут себя подобно гидрофильным коллоидам. Это объясняет высокую растворимость пролина, а также его способность связываться с поверхностными гидрофильными остатками белков. Следовательно, накопление пролина как осмотически активного органического вещества способствует удержанию воды в клетке. Обработка микроэлементами и регуляторами роста семян, проросших при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, показывает, что в первом случае увеличение влагоудерживающей способности растений выше, чем во втором. У них повышено содержание связанной воды и пролина, что способствует устойчивости растений к неблагоприятным факторам [19].

Оценка устойчивости растений с точки зрения изменения урожайности в зависимости от ее продуктивности может быть проведена в полевых испытаниях для определения специфических и неспецифических реакций растений. Обработка семян питательными растворами изменяет величину окислительно-восстановительного потенциала во внутриклеточной и околоклеточной среде, регулируя активность эндогенных биооксидантов, увеличивает скорость осмотического поглощения влаги клетками семенной оболочки, ускоряя набухание, прорастание и полевую всхожесть семян. Ускорение этих процессов обеспечивает прохождение всех этапов онтогенеза в оптимальные сроки, что особенно важно в условиях недостаточного увлажнения при высокой плотности посева.

Обсуждение и заключение

Внешние и внутренние факторы должны рассматриваться одновременно в виде взаимозависимых факторов роста и развития растений. Скорость подачи воды в корневую систему, стебли и листья, масса корней, площадь листьев, урожайность пшеницы зависят от плотности посева. Оценка влияния плотности высева семян пшеницы на урожайность и параметров сорбционных свойств корневых систем пшеницы проведена с использованием уравнения Гарднера. В опытах установлено, что для плотности посева пшеницы при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га соотношение между значениями коэффициентов диффузии $D(6,5)/D(2,6)$, полученными с учетом выросших стеблей, составило $\sim 1,7$ раза. Накопление пролина в клетке как осмотически активного органического вещества способствует удержанию в ней воды. Обработка микроэлементами и регуляторами роста семян, проросших при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, приводит к большему росту концентрации пролина в цитоплазме в первом случае, чем во втором. Причиной низкого коэффициента продуктивного кущения посевов с высокой нормой высева в основном может быть недостаток влаги.

Таблица 1
Table 1

Агрохимическое обследование почвы опытного поля
Agrochemical survey of the soil of the experimental field

№ участка / area	Слой, см / Layer, cm	Содержание в слое от 0 до 30 см, мг/кг почвы / Content in layer from 0 to 30 cm, mg/kg of soil											
		N _{Nitras}	Nitrit	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	Humus, %	pH
1	от 0 до 10	7,5	18,8	19	341	0,5	8,47	1,58	0,10	0,24	0,014	4,2	6,10
	от 10 до 20	4,8	20,0	22	337	0,4	7,52	1,34	0,12	0,24	0,015	4,5	6,00
2	от 20 до 30	4,4	22,2	23	342	0,3	9,40	1,42	0,11	0,24	0,012	4,4	6,05
	от 0 до 10	7,9	17,8	19	336	0,4	7,78	2,07	0,16	0,24	0,015	4,3	6,20
	от 10 до 20	4,7	19,8	26	356	0,1	7,65	1,64	0,08	0,25	0,017	4,5	5,95
	от 20 до 30	4,5	22,4	25	363	0,3	10,02	1,58	0,15	0,23	0,012	4,5	6,00
3	от 0 до 10	7,1	19,8	19	345	0,5	8,77	1,18	0,08	0,24	0,014	4,1	6,50
	от 10 до 20	4,8	20,3	19	338	0,8	8,52	1,54	0,10	0,24	0,014	4,5	6,00
	от 20 до 30	4,4	21,3	19	322	0,3	8,40	1,32	0,11	0,24	0,012	4,4	6,05
	от 0 до 10	7,4	18,3	15	300	0,4	7,91	2,27	0,09	0,25	0,014	4,5	5,95
4	от 10 до 20	4,8	20,9	16	297	0,3	8,50	1,82	0,12	0,24	0,012	4,5	6,00
	от 20 до 30	3,4	20,0	16	301	0,1	7,71	1,58	0,14	0,24	0,018	4,4	6,00

Неодинаковая способность к образованию придаточных корней, которая наблюдается в пределах семейства озимой пшеницы, относится к феномену регенерации. Различия в активности корнеобразования обусловлены взаимосвязью между регенеративной активностью (способностью развивать побег) и засухоустойчивостью пшеницы.

Явление регенерации зависит от плотности посева и является универсальным показателем изменений осмотических факторов. Генетические основы адаптации растений проявляются не только в зависимости от климатических условий, но и от условий обработки почвы. Регулярные периоды засухи приводят к различным эволюционным адаптациям. Плотность посева определяет морфологические, физиологические и биохимические характеристики клеточных адаптивных механизмов растений к переносу воды, ее дефициту, который проявляется непосредственно на молекулярном уровне, связанном с прямой защитной реакцией на стресс, вызванный недостатком воды в клетках. У озимой пшеницы следует отметить способность быстро начинать рост и ассимиляцию. В то же время было отмечено заметное изменение продолжительности фаз в зависимости от метеорологической ситуации. Структура и динамика развития растений позволяет говорить об изменчивости онтогенетического состава, уровня жизнеспособности и пространственного распределения особи в зависимости от климатических, ценологических, эдафических факторов окружающей среды, а также биологических свойств самих видов, т. е. генотипов пшеницы.

Важным фактором является структура почвы, которая определяет параметры водопроводности, а вид формирующейся корневой системы определяется скоростью поглощения воды и глубиной, с которой вода извлекается из почвы в расчете на одно растение. К факторам, определяющим влияние плотности посева на урожайность, относятся осмотические параметры мембран в клетках семян.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишнякова М. А. Генофонд зернобобовых культур и адаптивная селекция как факторы биологизации и экологизации растениеводства (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2008. Т. 43, № 3. С. 3–23. EDN: [JSDYRN](#)
2. Влияние средств химизации и биологизации на урожайность культур зернопропашного севооборота при разных способах основной обработки почвы / Ш. М. Абасов [и др.] // Плодородие. 2022. № 1. С. 54–57. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.124.14>
3. Теоретические основы эффективного применения современных ресурсосберегающих технологий возделывания зерновых культур / И. Г. Пыхтин [и др.] // Земледелие. 2016. № 6. С. 16–19. EDN: [WWRGXT](#)
4. Кочетов А. А., Драгавцев В. А., Макарова Г. А. Эколого-генетические основы ускоренной интродукции культурных растений // Сельскохозяйственная биология. 2012. Т. 47, № 1. С. 3–6. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.1.3rus>
5. Ахматова М. Х., Батова З. С., Агмурзаев О. Х. Учет состояния почвенного плодородия и информационное обеспечение в КБР плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения // Московский экономический журнал. 2018. № 4. С. 37–45. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2018-14036>
6. Агрофизические условия плодородия агропочв алтайской лесостепи и модель их эффективного плодородия / Л. М. Татаринцев [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 2(148). С. 22–29. URL: <https://clck.ru/36wDJS> (дата обращения: 01.07.2023).

7. Current Situation and Perspectives of Education for Agricultural Mechanization in the Republic of Buryatia of the Russian Federation / M. Dorzhiev [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 50, Issue 4. P. 20–24. EDN: UCDDVX
8. Current Situation and Perspectives for Soybean Production in Amur Region, Russian Federation / B. Boiarskii [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 2. P. 33–38. EDN: FCOOED
9. Нормы высева семян овса на осушаемых землях / Ю. И. Митрофанов [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 3. С. 56–59. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/56-59>
10. Политыко П. М., Зяблова М. Н., Пасечник Д. В. Урожайность сортов овса при разных технологиях // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2012. № 1. С. 26–31. EDN: OQOCCB
11. Методология прогнозирования трансгрессий по хозяйственно ценным признакам растений / Г. А. Макарова [и др.] // Методические рекомендации. СПб., 2009. 54 с. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4098.1843>
12. Водный режим и фотосинтетическая способность у генотипов озимой пшеницы в условиях засухи / Ф. И. Г. Гасимова [и др.] // Сельскохозяйственная биология. 2012. Т. 47, № 1. С. 78–82. EDN: PVWOJD
13. Дзюбенко Н. И., Абдушаева Я. М. Адаптация американских экотипов *onobrychis arenaria* (KIT) SER в условиях Новгородской области // Сельскохозяйственная биология. 2012. Т. 47, № 4. С. 106–112. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.4.106rus>
14. Дебелый Г. А., Гончаров А. Г., Меднов А. В. Об оценке адаптивной способности и стабильности у яровой вики по высоте растений в одновидовых и смешанных посевах // Сельскохозяйственная биология. 2011. Т. 46, № 2. С. 90–92. EDN: NQYTRP
15. Osmotic Adjustment and Activity of Stress-Related Genes in Wheats of Different Origin Exposed to Water Stress / E. Solařová [et al.] // Russian Journal of Plant Physiology. 2016. Vol. 63, Issue 4. P. 532–541. <https://doi.org/10.1134/S1021443716030146>
16. Effect of Drought and Combined Drought and Heat Stress on Polyamine Metabolism in Proline-Over-Producing Tobacco Plants / M. Cvikrova [et al.] // Plant Physiol. Biochem. 2013. Vol. 73, Issue 1. P. 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.08.005>
17. Alleviation of Osmotic Stress Effects by Exogenous Application of Salicylic or Absciscic Acid on Wheat Seedlings / I. Marcińska [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2013. Vol. 14, Issue 7. P. 13171–13193. <https://doi.org/10.3390/ijms140713171>
18. Das S. K., Ghosh G. K., Avasthe R. Valorizing Biomass to Engineered Biochar and its Impact on Soil, Plant, Water, and Microbial Dynamics: A review // Biomass Conversion and Biorefinery. 2022. Issue 12. P. 4183–4199. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00836-5>
19. Костин В. И., Исайчев В. А., Решетникова С. Н. Физиологические аспекты применения физических факторов, микроэлементов и регуляторов роста для повышения засухоустойчивости растений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 3(27). С. 58–67. URL: <https://rucont.ru/efd/278979> (дата обращения: 01.07.2023).

Поступила в редакцию 23.05.2023; поступила после рецензирования 26.08.2023; принята к публикации 18.09.2023

Об авторах:

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией «Технологии и машины для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве» Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: [AAZ-6056-2020](https://orcid.org/AAZ-6056-2020), misha2728@yandex.ru

Жалнин Эдуард Викторович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва,



1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Шибряева Людмила Сергеевна, доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6805-4492>, Researcher ID: A-7634-2014, lyudmila.shibryaeva@yandex.ru

Подзоров Алексей Викторович, научный сотрудник лаборатории Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-4555>, Scopus ID: 57211759710, alexvp900@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

М. Е. Чаплыгин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, целей и задач, подготовка первоначального варианта текста, анализ литературных источников, визуализация материалов, доработка текста и оформление материалов, формирование частных и общих выводов, итоговая переработка статьи.

Э. В. Жалнин – формулирование основной концепции исследования, целей и задач, разработка теоретических предпосылок, доработка текста, формирование общих выводов.

Л. С. Шибряева – разработка теоретических предпосылок, выбор сорта озимой пшеницы для исследования, участие в разработке методики опытов, обработка и анализ данных, обсуждение результатов.

А. В. Подзоров – практическое участие в проведении посевов и контроль за фазами развития растения, обработка и анализ данных, визуализация материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Vishnyakova M.A. The Gene Pool of Leguminous Crops and Adaptive Selection as Factors of Biologization and Greening of Crop Production (Review). *Agricultural Biology*. 2008;43(3):3–23. (In Russ.) EDN: JSDYRN
2. Abasov Sh.M., Gaplaev M.Sh., Khusaynov H.A., Terekbayev A.A., Abasov M.Sh. The Influence of Chemicalization and Biologization on the Yield of Crops in Grain-Row Crop Rotation Under Different Methods of Primary Tillage. *Fertility*. 2022;1:54–56. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.124.14>
3. Pykhtin I.G., Gostev A.V., Nitchenko L.B., Plotnikov V.A. Theoretical Foundations for the Effective Use of Modern Resource-Saving Technologies for Cultivating Grain Crops. *Agriculture*. 2016; 6:16–19. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WWRGXT
4. Kochetov A.A., Dragavtsev V.A., Makarova G.A. Ecological-Genetic Basis of Accelerated Introduction of Cultivated Plants. *Agricultural Biology*. 2012;47(1):3–6. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.1.3rus>
5. Akhmatova M.Kh., Batova Z.S., Atmurzaev O.Kh. Accounting for the State of Soil Fertility and Information Support in the CBD for Soil Fertility of Agricultural Lands. *Moscow Economic Journal*. 2018;4:37–45. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2018-14036>
6. Tatarintsev L.M., Tatarintsev V.L., Myagkiy P.A., Eshchenko S.I. Agrophysical Conditions of Fertility of Agricultural Soils of the Altai Forest-Steppe and a Model of Their Effective Fertility. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2017;2:22–29. Available at: <https://clck.ru/36wDJS> (accessed 01.07.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

7. Dorzhiev M., Hasegawa H., Sandakov T., Sandakova N., Luzbaev K. Current Situation and Perspectives of Education for Agricultural Mechanization in the Republic of Buryatia of the Russian Federation. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;50(4):20–24. EDN: UCDDVX
8. Boiarskii B., Hasegawa H., Lyude A., Kolesnikova E., Sinegovskaya V. Current Situation and Perspectives for Soybean Production in Amur Region, Russian Federation. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(2):33–38. EDN: FCOOED
9. Mitrofanov Yu.I., Antsiferova O.N., Petrova L.I., Pervushina N.K. Norms for Sowing Oat Seeds on Drained Lands. *Bulletin of Russian Agricultural Science*. 2018;(3):56–59. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/56-59>
10. Polityko P.M., Zyablova M.N., Pasechnik D.V. Productivity of Oat Varieties under Different Technologies. *Bulletin of RUDN University. Series: Agronomy and Animal Husbandry*. 2012;(1):26–31. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: OQOCCB
11. Makarova G.A., Mirskaya G.V., Kochetov A.A., Sinyavina N.G., Dragavtsev V.A. Methodology for Predicting Transgressions Based on Economically Valuable Plant Traits. *Guidelines*. 2009;54. (In Russ.) <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4098.1843>
12. Gasyмова F.I., Khalygzade M.N., Azizov I.V.A., Guliev N.M. Water Regime and Photosynthetic Capacity in Winter Wheat Genotypes under Drought Conditions. *Agricultural Biology*. 2012;47(1):78–82. (In Russ.) EDN: PVWOJD
13. Dzyubenko N.I., Abdushaeva Y.M. Adaptation of American Ecotypes of *Onobrychis Arenaria* (KIT) SER in the Conditions of the Novgorod Region. *Agricultural Biology*. 2012;47(4):106–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.4.106rus>
14. Debely G.A., Goncharov A.G., Mednov A.V. On Assessing the Adaptive Capacity and Stability of Spring Vetch Based on Plant Height in Single-Species and Mixed Crops. *Agricultural Biology*. 2011;46(2):90–92. (In Russ.) EDN: NQYTRP
15. Solařová E., Holková L., Bradáčová M., Smutná P. Osmotic Adjustment and Activity of Stress-Related Genes in Wheats of Different Origin Exposed to Water Stress. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2016;63(4):532–541. <https://doi.org/10.1134/S1021443716030146>
16. Cvikrova M., Gemperlova L., Martincova O., Vaňkova R. Effect of Drought and Combined Drought and Heat Stress on Polyamine Metabolism in Proline-Over-Producing Tobacco Plants. *Plant Physiol. Biochem.* 2013;73(1):7–15. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.08.005>
17. Marcińska I., Czyżyło-Mysza I., Skrzypek E., Grzesiak M.T., Janowiak F., Filek M., et al. Alleviation of Osmotic Stress Effects by Exogenous Application of Salicylic or Abscissic Acid on Wheat Seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013;14(7):13171–13193. <https://doi.org/10.3390/ijms140713171>
18. Das S.K., Ghosh G.K., Avasthe R. Valorizing Biomass to Engineered Biochar and Its Impact on Soil, Plant, Water, and Microbial Dynamics: A Review. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022;12:4183–4199. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00836-5>
19. Kostin V.I., Isaichev V.A., Reshetnikova S.N. Physiological Aspects of the Use of Physical Factors, Microelements and Growth Regulators to Increase Drought Resistance of Plants. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2014;(3):58–67. Available at: <https://rucont.ru/efd/278979> (accessed 01.07.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 23.05.2023; revised 26.08.2023; accepted 18.09.2023

About the authors:

Mikhail E. Chaplygin, Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, misha2728@yandex.ru

Eduard V. Zhalnin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal



Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Lyudmila S. Shibryaeva, Dr.Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6805-4492>, Researcher ID: A-7634-2014, lyudmila.shibryaeva@yandex.ru

Alexey V. Podzorov, Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-4555>, Scopus ID: 57211759710, alexvp900@yandex.ru

Authors contribution:

M. E. Chaplygin – scientific guidance, formulation of the basic concept of the study, its goals and objectives, preparation of the initial version of the text, analysis of literary sources, visualization of materials, revision of the text and design of materials, formation of particular and general conclusions, final revision of the article.

E. V. Zhalnin – formulation of the basic concept of the study of its goals and objectives, development of theoretical premises, revision of the text, formation of general conclusions.

L. S. Shibryaeva – development of theoretical premises, selection of winter wheat varieties for the study, participation in the development of experimental methods, data processing and analysis, discussion of results.

A. V. Podzorov – practical participation in seed sowing and monitoring the phases of plant development, data processing and analysis, visualization of materials.

All authors have read and approved the final manuscript.



Исследование изменения аминокислотного состава зерновых колосовых культур в процессе созревания

Ю. Ф. Лачуга¹, Б. Ч. Месхи², В. И. Пахомов^{2,3},
Д. В. Рудой^{2,3}, С. И. Камбулов^{2,3}, Т. А. Мальцева²

¹ Российская академия наук

(г. Москва, Российская Федерация)

² Донской государственный технический университет

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

³ Аграрный научный центр «Донской»

(г. Зерноград, Российская Федерация)

✉ rudoy.d@gs.donstu.ru

Аннотация

Введение. Аминокислотный состав комбикорма имеет огромное значение в кормлении всех видов животных. Недостаток той или иной аминокислоты ограничивает усвоение других аминокислот, в результате чего происходит чрезмерный расход комбикорма, ухудшается обмен веществ в организме животных, возрастает их восприимчивость к болезням. Использование зернового вороха пшеницы ранних фаз спелости как кормового сырья – перспективное направление развития кормовой базы, которое позволит получить сбалансированный по аминокислотному составу комбикорм с меньшим содержанием дорогостоящей рыбной муки – основного источника белка в комбикормах.

Цель статьи. Определить оптимальную стадию зерновых колосовых культур, при которой наблюдается высокое содержание белка и протеиногенных аминокислот. Предложенная технология и техническое средство ранней уборки зерновых колосовых культур позволит сократить агротехнологические сроки уборки, снизить потери от самоосыпания, и получить зерно повышенной питательной ценности.

Материалы и методы. Для исследования аминокислотного состава были взяты 4 образца зернового вороха: озимой пшеницы сорта «адмирал» и «лучезар», многолетней озимой пшеницы (трититригия) сорта «памяти Любимовой» и пырея сизого сорта «сова». Уборка пшеницы указанных сортов осуществлялась очесывающе-обмолачиваемым агрегатом в пяти фенологических стадиях (фазы роста представлены по шкале ВВСН): 77 – поздняя молочная спелость, 83 – ранняя фаза восковой спелости, 87 – твердая восковая спелость, 89 – полное созревание, 92 – перезрелость.

Результаты исследования. Результаты изучения аминокислотного состава четырех образцов зернового вороха пшеницы показали высокое содержание практически всех исследуемых аминокислот в фазе твердой восковой спелости, за исключением показателей аспарагиновой кислоты и аспарагина, глутаминовой кислоты и глутамина, а также триптофана.

Обсуждение и заключение. Зерновой ворох пшеницы восковой спелости является перспективным зерновым сырьем для производства комбикормов. Он позволит уменьшить количество дорогих компонентов, например, рыбной муки.

© Лачуга Ю. Ф., Месхи Б. Ч., Пахомов В. И., Рудой Д. В., Камбулов С. И., Мальцева Т. А., 2023



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

Ключевые слова: аминокислотный состав, пшеница, комбикорм, восковая спелость, многолетняя пшеница, сизый пырей «сова», трититригия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Для цитирования: Исследование изменения аминокислотного состава зерновых колосовых культур в процессе созревания / Ю. Ф. Лачуга [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 508–523. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.508-523>

Original article

Study of Changes in the Amino Acid Composition of Spiked Cereals during the Ripening Process

Yu. F. Lachuga^a, B. Ch. Meskhi^b, V. I. Pakhomov^{b,c},
D. V. Rudoy^{b,c}✉, S. I. Kambulov^{b,c}, T. A. Maltseva^b

^a Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)

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

^c Agrarian Research Center Donskoy
(Zernograd, Russian Federation)

✉ rudoy.d@gs.donstu.ru

Abstract

Introduction. The amino acid composition of compound feed is of great importance in feeding all kinds of animals. The lack of one or another amino acid limits the assimilation of other amino acids, resulting in excessive compound feed consumption, deterioration of the metabolism in the bodies of animals and increasing of their susceptibility to diseases. The use of grain heaps of wheat in the early ripening stages as feed raw materials is a promising direction for the development of the fodder base that will provide a balanced amino acid composition of compound feed with a lower content of expensive fish meal, which is the main source of protein in compound feeds.

Aim of the Article. The article is aimed at determining the optimal ripening stage of spiked cereals, at which a high content of protein and proteinogenic amino acids is observed. The proposed technology and technological tools for early harvesting of spiked cereals will reduce agrotechnical terms of harvesting, reducing losses from shatter losses, and get grain of enhanced nutritive value.

Materials and Methods. To study the amino acid composition, 4 samples of a winter wheat grain heap were taken: the winter wheat varieties Admiral and Luchezar, the perennial winter wheat (triticaria) variety Pamyati Lyubimovoy and the gray wheatgrass variety Sovy. Harvesting the wheat of these varieties was carried out by a combining-threshing unit in 5 phenological stages (growth stages are presented on the BBCH scale): 77 – late milk ripeness, 83 – early phase of wax ripeness, 87 – gold wax ripeness, 89 – full ripeness, 92 – overripeness.

Results. The results of analyzing amino acid composition of 4 samples of wheat grain heap showed a high content of almost all the amino acids studied in the phase of gold wax ripeness, except of aspartic acid and asparagine, glutamic acid and glutamine, and tryptophan.

Discussion and Conclusion. Grain heap of waxy ripeness wheat is a promising grain raw material for the production of compound feeds, which will reduce the amount of expensive components, such as fishmeal.

Keywords: amino acid composition, wheat, compound feed, wax ripeness, perennial wheat, gray wheatgrass sova, trititrigia

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

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

For citation: Lachuga Yu.F., Meskhi B.Ch., Pakhomov V.I., Rudoy D.V., Kambulov S.I., Maltseva T.A. Study of Changes in the Amino Acid Composition of Spiked Cereals during the Ripening Process. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):508–523. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.508-523>

Введение

По данным Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), а также Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО) на 2021 год¹, в ближайшие 10 лет будет увеличиваться спрос на сельскохозяйственные продукты. В том числе на комбикорма и сырье для его производства. Для правильного роста и развития животных и рыб необходимо обеспечить им полноценное кормление, удовлетворяющее потребности во всех необходимых веществах. Особое значение уделяется аминокислотам, дефицит которых приводит к нарушению роста и ухудшению общего состояния животного.

Так, важную роль в питании играют лимитирующие (критические) аминокислоты, дефицит или избыток которых влияет на усвоение других аминокислот. Лимитирующие аминокислоты у разных видов животных отличаются. Для птиц таковыми являются метионин и цистин, для свиней – лизин.

При составлении рецептуры кормов необходимо учитывать аминокислотный скор (отношение количества незаменимых аминокислот в исследуемом образце к количеству этих аминокислот в идеальном белке) и лимитирующие аминокислоты. В растительном сырье это триптофан, метионин и лизин. Белок животного происхождения более сбалансирован: к лимитирующим можно отнести фенилаланин и гистидин. Белок из дрожжевого сырья представлен лимитами гистидина, метионина и фенилаланина. Недостаток лимитирующих аминокислот в кормах может привести к нарушению обмена веществ, снижению иммунитета, ожирению и большому расходу корма [1].

По данным исследований² [2; 3], в процессе роста и созревания зерновых культур происходит изменение их биологической ценности. Максимальное содержание белка и клейковины в зерне пшеницы наблюдается в стадии молочно-восковой спелости. Кроме того, дополнительным источником питательных веществ может служить незерновая часть пшеницы. Данный вид кормового сырья раньше активно применялся в комбикормовом производстве при стационарном обмолоте. В настоящее время комбайновая уборка не предполагает сбор незерновой части, в результате чего использование такого вида кормового сырья было прекращено.

Таким образом, использование зернового вороха пшеницы ранних фаз спелости как кормового сырья является перспективным направлением развития кормовой базы и позволит получить сбалансированный по аминокислотному составу комбикорм с меньшим содержанием дорогостоящей рыбной муки – основного источника белка в комбикормах.

¹ OECD-FAO Agricultural Outlook 2021–2030. Paris: OECD Publishing. 2021. URL: <https://doi.org/10.1787/19428846-en> (дата обращения: 20.06.2023).

² Абрисимова Н. А., Абрисимов С. С., Саенко Е. М. Кормовое сырье и добавки для объектов аквакультуры. 2-е изд. испр. Ростов н/Д: Медиа-Полис. 2006. 147 с.

В статье [3] представлены результаты изменения общего количества аминокислот в гранулированном корме, полученных из зернового вороха разных фаз спелости. Для определения лимитирующих аминокислот в зерновом ворохе, а также изменения аминокислотного состава в процессе созревания, необходимо получить данные по изменению массовой доли каждой аминокислоты. Полученные данные позволят правильно рассчитать аминокислотный скор производимого комбикорма при составлении рецептуры и получить конечный продукт высокого качества.

Обзор литературы

Изменению состава зерна в процессе созревания и его применению в кормовой и пищевой промышленности посвящено большое количество работ. Одним из главных преимуществ уборки зерна на ранних стадиях спелости является сокращение потерь. Известно, что после полного созревания зерна происходит процесс самоосыпания, и при несоблюдении агросроков уборки потери могут составлять по разным данным от 20 до 40 % после 20 дней наступления полной спелости³ [4–5]. Уборка зерна на ранней стадии спелости позволит сократить биологические потери и увеличить урожайность. Еще одним преимуществом уборки зерна ранних фаз спелости является его повышенная питательная ценность.

В одном из изученных нами исследований дано сравнение состава зерна трех сортов спельты в стадии молочной и полной спелости [6]. Образцы были проанализированы на содержание минеральных веществ (макро- и микронутриентов), заменимых и незаменимых аминокислот, жира и жирных кислот. Однако данные по изменению массовой доли незаменимой аминокислоты – триптофана, которая является лимитирующей в зерновом сырье, не представлены. Кроме того, отсутствуют данные по изменению состава зерна в фазе молочно-восковой и восковой спелости, что не дает общей картины изменения компонентов зерна в процессе созревания и не позволяет сделать вывод о стадии, в которой целесообразно убирать зерно и использовать его для пищевых и кормовых целей.

В другом научном исследовании представлены результаты анализа пищевой ценности спельты полной и молочной спелости [7]. Зерно молочной спелости предварительно подвергалось сушке при температуре 230 °С. В процессе сушки зерно меняло свой цвет от зеленого до желтовато-коричневого (золотистого). Сравнительная характеристика показала, что содержание белка выше в зеленой полбе (молочная спелость) на 0,1 %. Содержание углеводов меньше на 2,4 %. Полученные авторами данные не позволяют определить оптимальную стадию спелости, при которой наблюдается наибольшее содержание питательных веществ. Кроме того, зерно молочной спелости подвергается высокой температурной обработке в течение 12 часов, что может вызвать снижение количества аминокислот и белка за счет денатурации и, соответственно, повлиять на результаты анализов [8].

Также учеными проводилось исследование трех разных сортов пшеницы в четырех стадиях спелости (десятый, пятнадцатый, двадцатый и двадцать пятый дни после цветения при фазе полной спелости в качестве контроля) на следующие показатели: влажность, зольность, белок [9]. В том числе анализировались функциональные питательные вещества: клетчатка, фруктаны, фенолы, антиоксиданты, а также фитиновая кислота. Так, накопление функциональных соединений происходит до стадии

³ Пьянов В. С. Крупнотоварное производство зерна : моногр. Ставрополь. 2014. 244 с. EDN: WZGWBN ; Фусточенко А. Ю. Повышение эффективности функционирования жатки очесывающего типа совершенствованием параметров и режимов работы обтекателя : дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2015. 152 с.

молочной спелости. Затем они расходятся в процессе созревания зерна. При этом максимальное содержание белка и функциональных соединений наблюдается через 10 дней после цветения (молочная спелость). Далее компоненты пропорционально уменьшаются, и к полной спелости содержание белка уменьшается в среднем на 1,5 %.

Важно отметить, что в рассмотренных нами работах использована разная шкала определения той или иной фазы спелости. Ряд авторов для анализа изменения состава зерна использовали шкалу ВВСН [10–14]. В работе [10] рассматривалось изменение белкового состава (доля глина и глютелина) в зависимости от стадии заболачивания (стадия появления первого узла (ВВСН 31) и стадия колошения (ВВСН 51)).

Российские ученые исследовали несколько сортов зерна пшеницы и тритикале на разных стадиях спелости: молочной, тестообразной, восковой, твердой и на стадии перестоя [4]. Было определено, что максимальное содержание белка и клейковины наблюдалось в стадии молочной спелости. В тестообразной стадии количество питательных веществ уменьшалось. Далее оно снова увеличилось при фазах восковой и твердой спелости.

Таким образом, большое количество исследований различных российских и зарубежных ученых подтверждают, что на ранних фазах спелости зерно содержит больше питательных, функциональных и других полезных веществ⁴ [15–24].

Несмотря на большое количество существующих работ, нет информации по изменению аминокислотного состава зернового вороха на разных стадиях спелости. В связи с этим возникла необходимость провести анализ изменения аминокислотного состава в процессе созревания с целью определения оптимальной стадии созревания, при которой наблюдается максимальное содержание аминокислот с фиксацией каждой фазы по шкале ВВСН. Поскольку аминокислоты являются составляющей белка пшеницы, помимо аминокислотного состава зерновой ворох необходимо исследовать на содержание белка.

Материалы и методы

Для исследования аминокислотного состава были взяты четыре образца зернового вороха: озимой пшеницы сорта «адмирал» (ригидный сорт) и «лучезар» (легкообмолачиваемый сорт), многолетней озимой пшеницы (трититригия) сорта «памяти Любимовой» и пырея сизого сорта «сова».

Посев данных сортов был произведен на полях Аграрного научного центра «Донской» Зерноградского района Ростовской области в 2021 году. Почва опытного участка представляет собой чернозем обыкновенный карбонатный тяжелосуглинистый (Voronich Chernozems Pachic по WRB2014). Содержание гумуса в почве (по Тюрину) – 3,3 %, общего азота (ионометрический метод) – 28,2 мг/кг почвы; подвижного фосфора (по Кирсанову) – 19,0–24,5 мг/кг, калия (по Кирсанову) – 327–337 мг/кг почвы, pH солевой вытяжки – 7,1. За период вегетации растений проведены три подкормки удобрениями. Первую подкормку аммофосом в дозе 100 кг/га вносили одновременно с посевом семян, вторую и третью подкормки аммиачной селитрой по 70 кг/га вносили в фазу весеннего кущения и фазу выхода растений в трубку.

Уборку зерна на разных стадиях спелости осуществляли в июне 2022 года очесывающе-обмолачивающим агрегатом, созданным в результате совместной работы Аграрного научного центра «Донской» и Донского государственного технического университета (Патент RU 206 314 U1 МПК A01D 41/08 (2006.01)) [25; 26]. При проведении лабораторных исследований уборки зерна агрегатом была выбрана

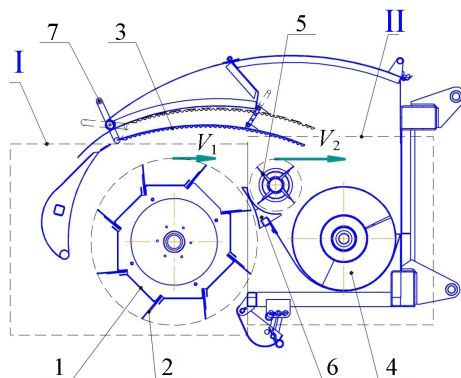
⁴ Корнев Г. В. Биологическое обоснование сроков и способов уборки зерновых культур. М. : Колос, 1971. 160 с.

длина очесывающего барабана $l = 2$ м. Для использования агрегата в промышленных масштабах длина очесывающего барабана должна быть не менее 6 м. Очесывающе-обмолачивающий агрегат будет агрегатироваться с трактором типа Т-150.

Выбор агрегата для уборки зерновых колосовых культур обоснован возможностью получить зерновой ворох пшеницы ранних фаз спелости. Традиционная комбайновая уборка, включающая операции срезания колоса, его обмолота и выделения зерна, не позволяет убирать зерно на ранних стадиях спелости, поскольку в такой стадии зерно имеет сильную связь с колосом и не может быть выделено в молотильном барабане. Применение очесывающей жатки, агрегируемой с комбайном, для уборки зерна ранних фаз спелости так же не эффективно, поскольку после очесывания колоса зерновая масса поступает в молотильный барабан и далее на разделение зерна от зерновой примеси.

Дополнительным преимуществом очесывающе-обмолачивающего агрегата для уборки зерновых колосовых культур является агрегатирование с трактором, который имеет небольшие энергоёмкость и вес, что обеспечивает меньшее давление на почву. Схема и процесс работы очесывающе-обмолачивающего агрегата представлены на рисунках 1 и 2.

Полученный зерновой ворох пяти фенологических стадий (фазы роста представлены по шкале ВВСН: 77 – поздняя молочная спелость (рис. 3), 83 – ранняя фаза восковой спелости, 87 – твердая восковая спелость, 89 – полное созревание, 92 – перезрелость [10–14]) был проанализирован на протеиногенные незаменимые (лизин, фенилаланин, лейцин, изолейцин, метионин, валин, треонин, триптофан) и заменимые (аргинин, тирозин, гистидин, пролин, серин, аланин, цистин, аспарагиновая кислота, глутаминовая кислота) аминокислоты по стандартной методике, описанной в ГОСТ Р 55569 и ГОСТ Р 52347 методом капиллярного электрофореза на оборудовании «Капель 104-Т». Массовую долю белка определяли методом Кельдаля по ГОСТ 10846 с помощью дигестора серии DK 8 и полуавтоматического дистиллятора UDK 139.



Р и с. 1. Схема агрегата для уборки урожая новым агрегатом I – очесывающий блок; II – обмолачивающий блок; 1 – очесывающий барабан; 2 – очесывающие гребенки; 3 – сменные деки; 4 – транспортирующий шнек; 5 – лопастной битер; 6 – отсекающий щиток; 7 – механизм параллельного и углового перемещения; V1 – линейная скорость на радиусе очесывающего барабана; V2 – линейная скорость на радиусе лопастного битера

Fig. 1. The scheme of the harvesting unit with a new aggregate I – combing block; II – threshing block; 1 – combing drum; 2 – combing combs; 3 – replaceable decks; 4 – transporting screw; 5 – blade beater; 6 – cutting flap; 7 – mechanism of parallel and angular displacement; V1 – linear velocity at the radius of the combing drum; V2 – linear speed at the radius of the blade beater



Р и с. 2. Процесс уборки зерновых колосовых культур ранних фаз спелости очесывающе-обмолачивающим агрегатом
F i g. 2. Process of harvesting spiked cereals of the early phases of ripeness with a combing and threshing unit



Р и с. 3. Зерновой ворох пшеницы ранних фаз спелости
F i g. 3. Grain heap of wheat of early ripeness phases

Анализ полученного вороха зерновых колосовых культур на содержание массовой доли аминокислот и белка был проведен в течение 24 часов после его уборки.

Результаты исследования

Результаты анализа аминокислотного состава четырех образцов зернового вороха пшеницы представлены в таблицах 1–4. Результаты анализа массовой доли белка четырех образцов представлены на рисунке 4.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Изменение аминокислотного состава зернового вороха озимой пшеницы сорта «адмирал» в процессе созревания

Changes in the amino acid composition of the grain heap of winter wheat of the variety Admiral during the ripening process

Наименование аминокислоты, % / Name of the amino acid, %	Фаза роста по шкале BBCH / BBCH growth stage				
	77	83	87	89	92
1	2	3	4	5	6
Аргинин / Arginine	0,38±0,15	0,42±0,17	0,66±0,26	0,68±0,27	0,66±0,26
Лизин / Lysine	0,36±0,12	0,49±0,17	0,73±0,25	0,66±0,22	0,55±0,19
Тирозин / Tyrosine	0,25±0,08	0,28±0,08	0,34±0,10	0,30±0,09	0,28±0,08
Фенилаланин / Phenylalanine	0,35±0,11	0,30±0,09	0,58±0,17	0,52±0,16	0,49±0,15
Гистидин / Histidine	0,25±0,13	0,31±0,16	0,54±0,27	0,60±0,30	0,63±0,32
Лейцин + изолейцин / Leucine + isoleucine	0,90±0,23	0,95±0,25	1,13±0,29	1,15±0,30	1,18±0,31
Метионин / Methionine	0,13±0,04	0,15±0,05	0,26±0,09	0,19±0,06	0,19±0,06
Валин / Valin	0,46±0,18	0,40±0,16	0,65±0,26	0,68±0,27	0,70±0,28
Пролин / Proline	0,81±0,21	0,75±0,20	1,17±0,30	1,30±0,34	1,32±0,34
Треонин / Threonine	0,33±0,13	0,30±0,12	0,58±0,23	0,58±0,23	0,61±0,25
Серин / Serin	0,41±0,11	0,35±0,91	0,65±0,26	0,64±0,23	0,60±0,16
Аланин / Alanin	0,41±0,11	0,35±0,91	0,77±0,20	0,67±0,17	0,63±0,16

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5	6
Глицин / Glycine	0,43±0,15	0,35±0,12	0,66±0,22	0,60±0,20	0,58±0,20
Цистин / Cystine	0,33±0,17	0,25±0,13	0,46±0,23	0,40±0,20	0,37±0,19
Аспарагиновая кислота + аспарагин / Aspartic acid + asparagine	0,49±0,20	0,63±0,25	0,45±0,18	0,31±0,12	0,30±0,12
Глутаминовая кислота + глутамин / Glutamic acid + glutamine	1,40±0,56	0,83±0,33	0,58±0,23	0,55±0,22	0,50±0,20
Триптофан / Tryptophan	0,35±0,14	0,28±0,11	0,22±0,09	0,16±0,06	0,14±0,06
Сумма / Total	8,04	7,39	10,43	9,99	9,73

Таблица 2

Table 2

**Изменение аминокислотного состава зернового вороха озимой пшеницы
сорта «лучезар» в процессе созревания**

**Changes in the amino acid composition of the grain heap of winter wheat
of the variety Luchezar during the ripening process**

Наименование аминокислоты, % / Name of the amino acid, %	Фаза роста по шкале BBCH / BBCH growth phase				
	77	83	87	89	92
Аргинин / Arginine	0,33±0,13	0,37±0,15	0,47±0,19	0,57±0,29	0,57±0,23
Лизин / Lysine	0,27±0,09	0,30±0,10	0,33±0,11	0,31±0,11	0,25±0,09
Тирозин / Tyrosine	0,21±0,06	0,22±0,07	0,30±0,09	0,28±0,08	0,21±0,06
Фенилаланин / Phenylalanine	0,38±0,11	0,33±0,10	0,54±0,16	0,47±0,14	0,42±0,13
Гистидин / Histidine	0,17±0,09	0,21±0,11	0,49±0,25	0,56±0,28	0,60±0,30
Лейцин + изолейцин / Leucine + isoleucine	0,88±0,23	0,92±0,24	1,24±0,32	1,27±0,33	1,30±0,34
Метионин / Methionine	0,09±0,03	0,10±0,03	0,22±0,07	0,17±0,06	0,14±0,05
Валин / Valin	0,41±0,16	0,25±0,10	0,52±0,20	0,53±0,21	0,55±0,22
Пролин / Proline	0,91±0,24	0,77±0,20	1,24±0,32	1,27±0,33	1,30±0,34
Треонин / Threonine	0,28±0,96	0,25±0,10	0,42±0,17	0,42±0,17	0,41±0,16
Серин / Serin	0,42±0,11	0,39±0,10	0,63±0,16	0,59±0,15	0,58±0,15
Аланин / Alanin	0,34±0,09	0,31±0,08	0,55±0,14	0,51±0,13	0,49±0,13
Глицин / Glycine	0,36±0,12	0,41±0,14	0,64±0,22	0,55±0,19	0,52±0,18
Цистин / Cystine	0,29±0,15	0,23±0,12	0,31±0,16	0,25±0,13	0,20±0,10
Аспарагиновая кислота + аспарагин / Aspartic acid + asparagine	0,48±0,19	0,53±0,21	0,33±0,13	0,26±0,10	0,23±0,09
Глутаминовая кислота + глутамин / Glutamic acid + glutamine	1,86±0,74	1,59±0,64	0,47±0,19	0,45±0,18	0,40±0,16
Триптофан / Tryptophan	0,40±0,16	0,36±0,14	0,25±0,10	0,14±0,06	0,10±0,04
Сумма / Total	8,08	7,54	8,95	8,60	8,27

Т а б л и ц а 3

Table 3

Изменение аминокислотного состава зернового вороха многолетней озимой пшеницы (трититригия) сорта «памяти Любимовой» в процессе созревания

Changes in the amino acid composition of the grain heap of perennial winter wheat (trititrigia) of the variety Pamyati Lyubimovoy during the ripening process

Наименование аминокислоты, % / Name of the amino acid, %	Фаза роста по шкале BBCH / BBCH growth phase				
	77	83	87	89	92
Аргинин / Arginine	0,79±0,32	0,85±0,34	0,88±0,35	0,93±0,37	0,91±0,36
Лизин / Lysine	0,45±0,15	0,53±0,18	0,57±0,19	0,52±0,18	0,48±0,16
Тирозин / Tyrosine	0,38±0,11	0,45±0,14	0,55±0,17	0,49±0,15	0,47±0,14
Фенилаланин / Phenylalanine	0,50±0,15	0,57±0,17	0,65±0,35	0,60±0,18	0,55±0,17
Гистидин / Histidine	0,46±0,23	0,53±0,27	0,57±0,29	0,60±0,30	0,62±0,31
Лейцин + изолейцин / Leucine + isoleucine	1,05±0,27	1,21±0,31	1,30±0,34	1,35±0,35	1,35±0,35
Метионин / Methionine	0,19±0,06	0,25±0,09	0,36±0,12	0,30±0,10	0,25±0,09
Валин / Valin	0,73±0,29	0,87±0,35	0,89±0,36	0,95±0,38	0,99±0,40
Пролин / Proline	1,22±0,32	1,35±0,35	1,44±0,37	1,49±0,39	0,54±0,14
Треонин / Threonine	0,37±0,15	0,45±0,18	0,51±0,20	0,54±0,22	0,55±0,22
Серин / Serin	0,63±0,16	0,67±0,17	0,72±0,19	0,69±0,18	0,65±0,17
Аланин / Alanin	0,47±0,12	0,57±0,15	0,65±0,17	0,60±0,16	0,57±0,15
Глицин / Glycine	0,49±0,17	0,59±0,20	0,73±0,25	0,69±0,23	0,64±0,22
Цистин / Cystine	0,35±0,18	0,48±0,24	0,56±0,28	0,52±0,26	0,44±0,22
Аспарагиновая кислота + аспарагин / Aspartic acid + asparagine	0,68±0,27	0,77±0,31	0,85±0,34	0,79±0,32	0,74±0,30
Глутаминовая кислота + глутамин / Glutamic acid + glutamine	1,99±0,80	1,65±0,66	0,97±0,39	0,74±0,30	0,72±0,29
Триптофан / Tryptophan	0,55±0,22	0,49±0,20	0,43±0,17	0,29±0,12	0,24±0,10
Сумма / Total	11,3	12,28	12,63	12,09	10,71

Т а б л и ц а 4

Table 4

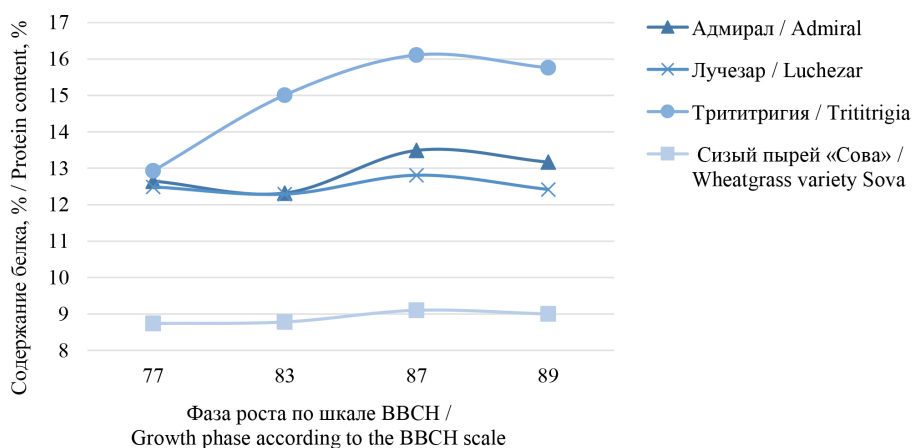
Изменение аминокислотного состава зернового вороха пырея сизого сорта «сова» в процессе созревания

Change in the amino acid composition of the grain heap of gray wheatgrass of the variety Sovo during the ripening process

Наименование аминокислоты, % / Name of the amino acid, %	Фаза роста по шкале BBCH / BBCH growth phase				
	77	83	87	89	92
1	2	3	4	5	6
Аргинин / Arginine	0,25±0,10	0,31±0,12	0,39±0,16	0,43±0,17	0,44±0,18
Лизин / Lysine	0,15±0,05	0,19±0,06	0,26±0,09	0,22±0,07	0,20±0,07
Тирозин / Tyrosine	0,16±0,05	0,19±0,06	0,25±0,08	0,24±0,07	0,21±0,06

Окончание табл. 4 / End of table 4

1	2	3	4	5	6
Фенилаланин / Phenylalanine	0,25±0,08	0,29±0,09	0,36±0,11	0,32±0,10	0,29±0,096
Гистидин / Histidine	0,20±0,10	0,25±0,13	0,38±0,19	0,43±0,22	0,48±0,24
Лейцин + изолейцин / Leucine + isoleucine	0,68±0,18	0,75±0,20	0,84±0,22	0,90±0,23	0,95±0,25
Метионин / Methionine	0,12±0,04	0,18±0,06	0,23±0,08	0,20±0,07	0,20±0,07
Валин / Valin	0,31±0,12	0,28±0,11	0,35±0,14	0,42±0,17	0,47±0,19
Пролин / Proline	0,78±0,20	0,60±0,16	0,89±0,23	0,93±0,24	0,95±0,25
Треонин / Threonine	0,21±0,08	0,19±0,08	0,34±0,14	0,29±0,12	0,33±0,13
Серин / Serin	0,32±0,08	0,28±0,07	0,42±0,11	0,39±0,10	0,36±0,09
Аланин / Alanin	0,29±0,08	0,25±0,07	0,37±0,10	0,35±0,09	0,35±0,09
Глицин / Glycine	0,25±0,09	0,32±0,11	0,42±0,14	0,39±0,13	0,34±0,12
Цистин / Cystine	0,21±0,11	0,18±0,09	0,25±0,13	0,20±0,10	0,17±0,09
Аспарагиновая кислота + аспарагин / Aspartic acid + asparagine	0,35±0,14	0,32±0,13	0,29±0,12	0,20±0,08	0,21±0,08
Глутаминовая кислота + глутамин / Glutamic acid + glutamine	1,24±0,50	1,04±0,42	0,47±0,19	0,33±0,13	0,30±0,12
Триптофан / Tryptophan	0,24±0,10	0,21±0,08	0,18±0,07	0,10±0,04	0,09±0,04
Сумма / Total	6,01	5,83	6,69	6,34	6,34



Р и с. 4. Изменение содержания массовой доли белка зерновых колосовых культур в процессе созревания

Fig. 4. Changes in the content of the mass fraction of protein of grain crops during the ripening process

Результаты анализа аминокислотного состава и массовой доли белка четырех образцов зернового вороха пшеницы показали максимальное их содержание в фазе твердой восковой спелости (87 по шкале BBCH). За исключением аргинина, гистидина, лейцина и изолейцина, валина, пролина и треонина. Наиболее высокое содержание аминокислот и белка наблюдается в зерновом ворохе многолетней озимой пшеницы (трититригия) сорта «памяти Любимовой».

Обсуждение и заключение

В заключение можно отметить, что при значении шкалы ВВСН 87 (твердая восковая спелость) накапливалось наибольшее количество незаменимых аминокислот. Несмотря на то, что такие аминокислоты как аргинин, гистидин, лейцин и изолейцин, валин, пролин и треонин имеют максимальное содержание в зерне в фазе полной спелости, суммарное количество исследуемых протеиногенных аминокислот выше в фазу твердой восковой спелости в среднем на 5 %. Кроме того, суммарное количество аминокислот у всех исследуемых культур уменьшается после наступления полной спелости. Таким образом, разница между стадией твердой восковой спелости (87) и стадией переспелости (перестой на корню – 92) составляет от 5 до 15 %.

Массовая доля белка в зерновых колосовых культурах выше в стадии твердой восковой спелости (87) в среднем на 10 %.

У сизого пырея сорта «сова» в меньшей степени наблюдается изменение аминокислотного состава после наступления полной спелости. Предположительно, это связано с особенностями культуры, в процессе созревания которой некоторые аминокислоты переходят в зеленую незерновую часть, и аминокислотный состав незначительно изменяется. В других исследуемых культурах (многолетней озимой пшенице (трититригия) сорта «памяти Любимовой» и озимой пшенице сортов «адмирал» и «лучезар») наблюдается «стекание» аминокислот и белка после наступления полной спелости.

Таким образом, зерновые колосовые культуры, убранные в стадии твердой восковой спелости (87) могут быть использованы как сырье для производства кормовой добавки повышенной питательной ценности. Это позволит использовать доступное недорогое сырье и уменьшить содержание дорогостоящей рыбной муки, которая в большинстве случаев является импортной. Также уборка зерновых колосовых культур в фазу твердой восковой спелости позволит сократить количество дней уборки после наступления полной спелости, тем самым минимизировав потери от самоосыпания в результате перестоя на корню, что будет способствовать системному развитию кормовой и сырьевой базы.

Зерновые колосовые культуры ранних фаз спелости можно использовать в пищевой промышленности, например, в качестве добавки в хлебобулочные изделия [27]. Поскольку зерновой ворох пшеницы ранних фаз спелости имеет высокое содержание клетчатки, он может быть использован как субстрат для выращивания пробиотических бактерий и получения кормовых и пищевых добавок [28].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмаков В. И., Колмакова А. А. Аминокислоты в перспективных кормах для аквакультуры рыб: обзор экспериментальных данных // Журнал СФУ. Биология. 2020. Т. 13, № 4. С. 424–442. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0332>
2. Динамика накопления сухого вещества и изменение химического состава зерна при созревании / Д. В. Сандрыкин [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 12. С. 32–33. EDN: OKKJAV
3. Особенности технологии производства корма из зернового вороха при ранней и сверхранней уборке / В. И. Пахомов [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 1. С. 16–19. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-1-16-19>

4. Динамика физических и биохимических свойств в процессе созревания зерна озимой тритикале в условиях ЦРНЗ (×TRITICOSECALE WITTM.) / Ю. Н. Котенко [и др.] // Известия ТСХА. 2020. № 3. С. 42–55. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2020-3-42-55>
5. Беренштейн И. Б., Шабанов Н. П. Ресурсосберегающие технологии уборки зерновых (колосовых) культур // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2017. № 10 (173). С. 62–73. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/resursosberegayuschie-tehnologii-uborki-zernovyh-kolosovyh-kultur/viewer> (дата обращения: 20.06.2023).
6. Green Grain of Spelt (Triticum aestivum ssp. spelta) Harvested at the Stage of Milk-Dough as a Rich Source of Valuable Nutrients / P. Kraska [et al.] // Emirates Journal of Food and Agriculture. 2019. Vol. 31, Issue 4. Pp. 263–270. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i4.1931>
7. Distinguishing Ripe Spelt from Processed Green Spelt (Grünkern) Grains: Methodological Aspects and the Case of Early La Tène Hochdorf (Vaihingen a.d. Enz, Germany) / M. Berihuete Azorín [et al.] // Journal of Archaeological Science. 2020. Vol. 118. Article no. 105143. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105143>
8. Analysis of the Micronization Process Effect on the Amino Acid Composition in Compound Feed / D. Rudoy [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 210. Article no. 06012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021006012>
9. Changes in the Functional Constituents and Phytic Acid Contents of Firiks Produced from Wheats at Different Maturation Stages / B. Özkaya [et al.] // Food Chemistry. 2018. Vol. 246. Pp. 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.022>
10. Wollmer A. C., Pitann B., Mühling K. H. Grain Storage Protein Concentration and Composition of Winter Wheat (Triticum Aestivum L.) as Affected by Waterlogging Events During Stem Elongation or Ear Emergence // Journal of Cereal Science. 2018. Vol. 83. Pp. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.007>
11. The Phenological Growth Stages of Different Amaranth Species Grown in Restricted Spaces Based in BBCH Code / M. Martínez-Núñez [et al.] // South African Journal of Botany. 2019. Vol. 124. Pp. 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.035>
12. Brandán J. P., Curti R. N., Acreche M. M. Phenological Growth Stages in Chia (Salvia Hispanica L.) According to the BBCH Scale // Scientia Horticulturae 2019. Vol. 255. Pp. 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.043>
13. Phenological Growth Stages of Mango (Mangifera Indica L.) According to the BBCH scale / P. M. Hernández Delgado [et al.] // Scientia Horticulturae. 2011. Vol. 130, Issue 3. Pp. 536–540. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.027>
14. Dynamic Quantitative Trait Loci (QTL) for Plant Height Predict Biomass Yield in Hybrid Rye (Secale Cereale L.) / T. Miedaner [et al.] // Biomass and Bioenergy. 2018. Vol. 115. Pp. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.001>
15. Finite Element and Applied Models of the Stem with Spike Deformation / B. Meskhi [et al.] // Agriculture. 2021. Vol. 11, Issue 11. Article no. 1147. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111147>
16. Review and Analysis of Perennial Cereal Crops at Different Maturity Stages / D. Rudoy [et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. Article no. 022111. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022111>
17. Коновалова Н. Ю., Коновалова С. С. Влияние сроков уборки зерновых культур на продуктивность и качество полученного зернофуража в условиях Европейского Севера России // Молочно-хозяйственный вестник. 2018. № 1 (29). С. 46–56. <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2018-00005>
18. Изменение химического состава и питательности кукурузы в заключительные периоды развития / Е. Ю. Герасимов [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2013. № 4 (23). С. 32–39. URL: <http://vestnik.ngiei.ru/wp-content/uploads/2014/12/Герасимов-Е.-Ю.-Дёмина-М.-А.-Завиваев-С.-Н.-Кучин-Н.-Н..pdf> (дата обращения: 20.06.2023).
19. Анализ способов консервации зерна пшеницы на ранних стадиях спелости / Д. В. Рудой [и др.] // Сборник научных трудов IX Междунар. науч.-практич. конф. «Инновационные технологии в науке и образовании». 2021. С. 131–137. <https://doi.org/10.23947/itno.2021.131-137>

20. Сроки и техническая оснащенность уборочного процесса в технологии производства плющеного кормового зерна / М. М. Константинов [и др.] // Известия ОГАУ. 2012. № 6 (38). С. 68–70. URL: <https://clck.ru/376uww> (дата обращения: 20.06.2023).
21. Налив зерна яровой мягкой пшеницы у сортов различной скороспелости / Ю. А. Гладков [и др.] // Вестник АГАУ. 2006. № 4. С. 14–19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/naliv-zerna-yaroy-mygkoy-pshenitsy-u-sortov-razlichnoy-skorospelosti> (дата обращения: 20.06.2023).
22. Ferrise R., Bindi M., Martre P. Grain Filling Duration and Glutenin Polymerization under Variable Nitrogen Supply and Environmental Conditions for Durum Wheat // Field Crops Research. 2015. Vol. 171. Pp. 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.016>
23. Occurrence of Rice Preharvest Sprouting Varies Greatly Depending on Past Weather Conditions During Grain Filling / H. Lee [et al.] // Field Crops Research. 2021. Vol. 264. Article no. 108087. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108087>
24. Polymerisation of Gluten Proteins in Developing Wheat Grain as Affected by Desiccation / S. Koga [et al.] // Journal of Cereal Science. 2017. Vol. 73. Pp. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.12.003>
25. Применение метода очеса в технологии уборки многолетних зерновых колосовых культур ранних фаз спелости / Д. В. Рудой [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). 2022. № 6 (180). С. 80–91. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-180-013>
26. Агрегат для уборки урожая : патент 206314 Российская Федерация / Лачуга Ю. Ф. [и др.]. № 2021116396 ; заявл. 07.06.2021 ; опубл. 06.09.2021. 7 с.
27. Scientific Aspects of the Study of the Protein Carbohydrate Raw Materials Biomodification Process in the Production of Functional Food Products / L. Enalyeva [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 210. Article no. 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021003004>
28. Complex Bioactive Supplements for Aquaculture-Evolutionary Development of Probiotic Concepts / N. A. Ushakova [et al.] // Probiotics and Antimicrobial Proteins. 2021. Vol. 13, Issue 4. Pp. 1696–1708. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09835-y>

Поступила в редакцию 01.06.2023; поступила после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 22.09.2023

Об авторах:

Лачуга Юрий Федорович, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук (119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-859X>, Researcher ID: [IQV-1037-2023](https://orcid.org/0000-0001-5474-859X), akadema1907@mail.ru

Месхи Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор, ректор Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9347-3410>, Researcher ID: [AAM-2853-2021](https://orcid.org/0000-0001-9347-3410), reception@donstu.ru

Пахомов Виктор Иванович, доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук, директор Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), заведующий кафедрой «Технологии и оборудование переработки продукции АПК» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, Researcher ID: [Y-7085-2019](https://orcid.org/0000-0002-8715-0655), v.i.pakhomov@mail.ru

Рудой Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета «Агропромышленный», ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Центр Агробiotехнологии» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), старший научный сотрудник отдела механизации растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>, Researcher ID: [AAU-5381-2020](https://orcid.org/0000-0002-1916-8570), rudoy.d@gs.donstu.ru

Камбулов Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), профессор кафедры «Технологии и оборудование 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

Мальцева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, научный сотрудник Центра развития территориального кластера «Долина Дона», доцент кафедры «Технологии и оборудование переработки продукции АПК» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3973-6846>, Researcher ID: ABB-4622-2020, tamaltseva.donstu@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Ю. Ф. Лачуга – формулирование основной концепции исследования и анализ результатов.

Б. Ч. Месхи – составление плана статьи и ее написание.

В. И. Пахомов – общее руководство, постановка задач исследования.

Д. В. Рудой – экспериментальные исследования.

С. И. Камбулов – экспериментальные исследования.

Т. А. Мальцева – подготовка текста, анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kolmakov V.I., Kolmakova A.A. Amino Acids in Promising Feeds for Fish Aquaculture: a Review of Experimental Data. *Journal of SIBFU. Biology*. 2020;13(4):424–442. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0332>
2. Sandrykin D.V., Kondratenko E.P., Egushova E.A., Pinchuk L.G. Dynamics of Accumulation of Dry Matter and Changes in the Chemical Composition of Grain during Maturation. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2011;12. (In Russ.) EDN: OKKJAV
3. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Rudoy D.V. Features of the Technology of Feed Production From Grain Heaps During Early and Late Harvesting. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021;(1):16–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-1-16-19>
4. Kotenko Yu.N., Yurkina A.I., Rubets V.S., Pylnev V.V., Kanaan M.D. Dynamics of Physical and Biochemical Properties in the Process of Maturation of Winter Triticale Grain Under Conditions of CRNZ (×TRITICOSE-CALE WITTM.). *Izvestiya TLCA*. 2020;(3):42–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2020-3-42-55>
5. Berenshtein I.B., Shabanov N.P. Resource-Saving Technologies of Harvesting Grain (Ear) Crops. *Izvestia of Agricultural Science of Taurida*. 2017;10(173):62–73. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/resursosberegayushchie-tehnologii-uborki-zernovyh-kolosovyh-kultur/viewer> (accessed 20.06.2023). (In Russ.)
6. Kraska P., Andruszczak S., Dziki D., Stocka M., Stocka N., Kwiecieńska-Poppe E., et al. Green Grain of Spelt (Triticum Aestivum Ssp. Spelta) Harvested at the Stage of Milk-Dough as a Rich Source of Valuable Nutrients. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2019;31(4):263–270. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i4.1931>
7. Berihuete-Azorín M., Stika H.P., Hallama M., Valamoti S.M. Distinguishing Ripe Spelt From Processed Green Spelt (Grünkern) Grains: Methodological Aspects and the Case of Early La Tène Hochdorf (Vaihingen a.d. Enz, Germany). *Journal of Archaeological Science*. 2020;118:105143. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105143>
8. Pakhomov V., Rudoy D., Maltseva T., Kulikova N., Ugrehelidze N., Enalyeva L., et al. Analysis of the Micronization Process Effect on the Amino Acid Composition in Compound Feed. *E3S Web of Conferences*. 2020;210:07003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021006012>

9. Özkaya B., Turksoy S., Özkaya H., Baumgartner B., Özkeser İ., Köksel H. Changes in the Functional Constituents and Phytic Acid Contents of Fıririks Produced From Wheats at Different Maturation Stages. *Food Chemistry*. 2018;246:150–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.022>
10. Wollmer A.C., Pitann B., Mühling K.H. Grain Storage Protein Concentration and Composition of Winter Wheat (*Triticum Aestivum* L.) as Affected by Waterlogging Events During Stem Elongation or Ear Emergence. *Journal of Cereal Science*. 2018;83:9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.007>
11. Martínez-Núñez M., Ruiz-Rivas M., Vera-Hernández P.F., Bernal-Muñoz R., Luna-Suárez S., Rosas-Cárdenas F.F. The Phenological Growth Stages of Different Amaranth Species Grown in Restricted Spaces Based in BBCH Code. *South African Journal of Botany*. 2019;124:436–443. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.035>
12. Brandán J.P., Curti R.N., Acreche M.M. Phenological Growth Stages in Chia (*Salvia hispanica* L.) According to the BBCH scale. *Scientia Horticulturae*. 2019;255:292–297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.043>
13. Hernández Delgado P.M., Aranguren M., Reig C., Galván D. F., Mesejo C., Fuentes A.M., et al. Phenological Growth Stages of Mango (*Mangifera indica* L.) According to the BBCH Scale. *Scientia Horticulturae*. 2011;130(3):536–540. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.027>
14. Miedaner T., Haffke S., Siekmann D., Fromme F.J., Roux S.R., Hackauf B. Dynamic quantitative trait loci (QTL) for plant height predict biomass yield in hybrid rye (*Secale cereale* L.). *Biomass and Bioenergy*. 2018;115:10–18. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.001>
15. Meskhi B., Rudoy D., Lachuga Y., Pakhomov V., Soloviev A., Matrosov A., et al. Finite Element and Applied Models of the Stem with Spike Deformation. *Agriculture*. 2021;11(11):1147. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111147>
16. Rudoy D., Pakhomov V., Olshevskaya A., Maltseva T., Ugrehelidze N., Zhuravleva A., et al. Review and Analysis of Perennial Cereal Crops at Different Maturity Stages. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;937:022111. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022111>
17. Konovalova N.Yu., Konovalova S.S. The Influence of Grain Harvesting Terms on the Productivity and Quality of the Resulting Grain Fodder in the Conditions of the European North of Russia. *Dairy Bulletin*. 2018;(1). (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2018-00005>
18. Gerasimov E.Yu., Demina M.A., Zavivaev S.N., Kuchin N.N. Changes in the Chemical Composition and Nutritional Value of Corn in the Final Periods of Development. *Bulletin of the NGIEI*. 2013;(4). (In Russ.) Available at: <http://vestnik.ngiei.ru/wp-content/uploads/2014/12/Герасимов-Е.-Ю.-Дёмина-М.-А.-Завиваев-С.-Н.-Кучин-Н.-Н..pdf> (accessed 20.06.2023).
19. Rudoy D.V., Pakhomov V.I., Sarkisyan D.S. Analysis of Methods for Preserving Wheat Grain at the Early Stages of Ripeness. *Collection of Scientific Papers of the 9th International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies in Science and Education"*. 2021;131–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/itno.2021.131-137>
20. Konstantinov M.M., Lovchikov A.P., Lovchikov V.P., Korytko A.A. Terms and Technical Equipment of the Harvesting Process in the Technology of Production of Flattened Feed Grain. *Izvestiya OGAU*. 2012;(6). (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/376uww> (accessed 20.06.2023).
21. Gladkov Yu.A., Evtefeev Yu.V., Kobzeva L.V., Bartaya N.N. Pouring Grain of Spring Soft Wheat in Varieties of Different Precocity. *Bulletin of the ASAU*. 2006;(4):14–19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/naliv-zerna-yarovoy-myagkoy-pshenitsy-u-sortov-razlichnoy-skorospelosti> (In Russ.) (accessed 20.06.2023).
22. Ferrise R., Bindi M., Martre P. Grain Filling Duration and Glutenin Polymerization Under Variable Nitrogen Supply and Environmental Conditions for Durum Wheat. *Field Crops Research*. 2015;171:23–31. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.016>
23. Lee H., Choi M., Hwang W., Jeong J., Yang J., Lee C. Occurrence of Rice Preharvest Sprouting Varies Greatly Depending on Past Weather Conditions During Grain Filling. *Field Crops Research*. 2021;264:108087. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108087>
24. Koga S., Böcker U., Wieser H., Koehler P., Uhlen A.K., Moldestad A. Polymerisation of Gluten Proteins in Developing Wheat Grain as Affected by Desiccation. *Journal of Cereal Science*. 2017;73:122–129. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.12.003>



25. Rudoy D.V., Pakhomov V.I., Kambulov S.I., Olshevskaya A.V., Zolotov S.A., Maltseva T.A. Application of Combing Method in the Technology of Perennial Grain Crops Harvesting in the Early Maturity Phases. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubGAU)*. 2022;(6):214–224. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-180-013>

26. Lachuga Yu.F., Meskhi B.Ch., Pakhomov V.I., Rudoy D.V. [Harvesting Unit]. Patent 206314 Russian Federation. 2021. 7 p.

27. Enalyeva L., Rudoy D., Alekseyev A., Tupolskih T., Lodyanov V. Scientific Aspects of the Study of the Protein Carbohydrate Raw Materials Biomodification Process in the Production of Functional Food Products. *E3S Web of Conferences*. 2020;210:03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021003004>

28. Ushakova N.A., Pravdin V.G., Kravtsova L.Z., Ponomarev S.V., Gridina T.S., Ponomareva E.N., et al. Complex Bioactive Supplements for Aquaculture-Evolutionary Development of Probiotic Concepts. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2021;13(4):1696–1708. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09835-y>

Submitted 01.06.2023; revised 15.09.2023; accepted 22.09.2023

About the authors:

Yuriy F. Lachuga, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Academician, Russian Academy of Sciences (14 Leninskiy Prospekt, Moscow 119991, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-859X>, Researcher ID: [IQV-1037-2023](https://orcid.org/0000-0001-5474-859X), akadema1907@mail.ru

Besarion Ch. Meskhi, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Rector of Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9347-3410>, Researcher ID: [AAM-2853-2021](https://orcid.org/0000-0001-9347-3410), reception@donstu.ru

Viktor I. Pakhomov, Dr.Sci. (Engr.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Agrarian Research Center Donskoy (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Head of the Department Technologies and equipment for processing agricultural products, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, Researcher ID: [Y-7085-2019](https://orcid.org/0000-0002-8715-0655), v.i.pakhomov@mail.ru

Dmitriy V. Rudoy, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Dean of Agribusiness Faculty, Leading researcher at the Research Laboratory Agrobiotechnology Center, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), Senior Researcher at the Department of Mechanization of Crop Production, Agricultural Research Center Donskoy (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>, Researcher ID: [AAU-5381-2020](https://orcid.org/0000-0002-1916-8570), rudoy.d@gs.donstu.ru

Sergey I. Kambulov, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Chief Researcher of the Department of Mechanization of Crop Production, Agricultural Research Center Donskoy (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), professor of the department Technologies and Equipment for Agricultural Products Processing, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Researcher ID: [A-6156-2019](https://orcid.org/0000-0001-8712-1478), kambulov.s@mail.ru

Tatyana A. Maltseva, Cand.Sci. (Engr.), Research of the Center of Development of the Territorial Cluster Dolina Dona, Assistant professor of the department Technologies and Equipment for Agricultural Products Processing, Don State Technical University (1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3973-6846>, Researcher ID: [ABB-4622-2020](https://orcid.org/0000-0002-3973-6846), tamaltseva.donstu@gmail.com

Authors contribution:

Yu. F. Lachuga – formulating the basic concept of the study and analyzing the results.

B. Ch. Meskhi – drawing up the outline of the article and its writing.

V. I. Pakhomov – general guidance, formulation of research objectives.

D. V. Rudoy – experimental research.

S. I. Kambulov – experimental research.

T. A. Maltseva – text writing, analyzing literary data.

All authors have read and approved the final manuscript.

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.353.6

doi: [10.15507/2658-4123.033.202304.524-541](https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.524-541)

Оригинальная статья



Параметры и режимы работы срезающе-измельчающего аппарата

Е. В. Труфляк✉, А. Н. Потебня

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

✉ trufljak@mail.ru

Аннотация

Введение. Для повышения эффективности уборки сельскохозяйственных культур необходимо совершенствовать существующие рабочие органы косилок и жаток комбайнов, которые будут обеспечивать их универсальность и многофункциональность. Повышение энерговооруженности отрасли в существующих экономических и политических условиях может быть достигнуто применением принципов ресурсосбережения и использованием альтернативных конструкций косилок и жаток комбайнов. Существующие режущие аппараты этих сельскохозяйственных машин не обеспечивают одновременное срезание, сбор и измельчение стеблей кукурузы, подсолнечника, камыша, а также веток с целью дальнейшей заделки в почву или сбора массы для использования в животноводстве. Поэтому обоснование конструктивно-технологической схемы, определение параметров и режимов работы универсального срезающе-измельчающего аппарата является актуальным.

Цель статьи. Повышение эффективности среза и измельчения растений путем обоснования структурно-функциональной схемы агрегата, рациональных параметров и режимов работы режущего аппарата.

Материалы и методы. С позиции теории вероятностного подхода обоснована физическая суть показателя кинематического режима. Исследования проводились в лаборатории кафедры эксплуатации и технического сервиса и учебном парке Кубанского государственного аграрного университета.

Результаты исследования. Обоснована структурно-функциональная схема измельчающего агрегата с режущим аппаратом срезающе-измельчающего типа. Для принятых условий работы аппарата, с позиций вероятностного подхода к взаимодействию ножей со стеблестоем, обоснована физическая суть показателя кинематического режима, характеризующего интенсивность взаимодействия определенного количества ножей с растениями на корню и распределенным по площади с различной плотностью стеблестоем.

Обсуждение и заключение. Полученные данные необходимы для проектирования и конструирования универсальных машин нового типа, обеспечивающих не только срез, но и сбор резанных стеблей, измельчение, возможный сбор измельченной массы или разбрасывание по полю. В зависимости от частоты вращения шнекового рабочего органа и показателя кинематического режима мощность изменяется от 4,99 кВт до 11,02 кВт, производительность – от 0,5 кг/с до 1,22 кг/с, а энергоемкость – от 11,02 до 4,99 кВт·с/кг.

© Труфляк Е. В., Потебня А. Н., 2023



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

Ключевые слова: режущий аппарат, шнек, срез, измельчение, сегменты, косилка, жатка

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Труфляк Е. В., Потебня А. Н. Параметры и режимы работы срезающе-измельчающего аппарата // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 524–541. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.524-541>

Original article

Parameters and Operation Modes of the Cutting and Chopping Apparatus

E. V. Truflyak , A. N. Potebnya

Kuban State Agrarian University

(Krasnodar, Russian Federation)

 trufliak@mail.ru

Abstract

Introduction. To improve the efficiency of harvesting crops, it is necessary to improve the existing tools of mowers and headers of combine harvesters that will ensure their versatility and multifunctionality. The increased power availability per the industry in the current economic and political conditions can be achieved by applying the principles of resource conservation and using alternative designs of reaper and headers. The existing cutting units of these agricultural machines do not provide simultaneous cutting, harvesting and chopping of corn stalks, sunflower stalks, reed stems and branches for the purpose of further incorporation into the soil or collection of plant mass to use in livestock. Therefore, substantiating the design and technological scheme and determining the parameters and modes for the universal cutting and chopping apparatus is relevant.

Aim of the Article. The aim of the work is to increase the efficiency of cutting and chopping plants by substantiating the structural and functional scheme of the unit and the ration parameters and operating modes of the cutting unit.

Materials and Methods. The physics of the kinematic mode indicator is substantiated in terms of the probability-based approach. The research was carried out in the laboratory of the Department of Operation and Technical Service and in the training park of Kuban State Agrarian University.

Results. There is substantiated the structural and functional scheme of the chopper unit with a cutterbar of cutting and chopping type. The physics of the kinematic mode index characterizing the intensity of interaction of a certain number of knives with plants on the root and stems distributed over the area with different density, is substantiated for the accepted conditions of the unit operation, in terms of probabilistic approach to the interaction of knives with stems in the form of plants on the root.

Discussion and Conclusion. The obtained data are necessary for designing universal machines of a new type, providing not only cutting, but also collecting of cut stems, chopping and possible collecting of the chopped crop or spreading chopped crop on the field. Depending on the rotational speed of the auger tool, an indicator of the kinematic mode, the power varies from 4.99 kW to 11.02 kW, productivity from 0.5 kg/s to 1.22 kg/s, and energy consumption from 11.02 to 4.99 kW-s/kg.

Keywords: cutting unit, auger, cutting, chopping, segments, mower, header

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

For citation: Truflyak E. V., Potebnya A. N. Parameters and Operation Modes of the Cutting and Chopping Apparatus. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):524–541. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.524-541>

Введение

Парк машин для сельского хозяйства имеет высокий износ при малой оснащённости. Производство кормо- и зерноуборочных комбайнов сократилось на 14 и 32 % соответственно в 2022 г. Более 70 % работающей сельскохозяйственной техники имеют эксплуатационный срок более 10 лет. Имеет место низкая энергетическая вооружённость отрасли. На 1 тыс. га в России приходится 2 комбайна, в Казахстане – 3 комбайна, в Беларуси – 5, в Канаде – 7, в Германии – 12, в США – 18. При этом необходимо ежегодно обновлять парк машин на 15 тыс. комбайнов. Подобное несоответствие ведет к низкой производительности труда, повышению агросроков и увеличению потерь при уборке урожая до 10–20 % от валового сбора.

Для увеличения эффективности уборки сельскохозяйственных культур необходимо совершенствовать существующие рабочие части косилок и жаток комбайнов, которые будут обеспечивать их универсальность и многофункциональность.

Повышение энерговооружённости отрасли в существующих экономических и политических условиях может быть достигнуто применением принципов ресурсосбережения и использования альтернативных конструкций косилок и жаток комбайнов.

Существующие режущие аппараты данных сельскохозяйственных машин не обеспечивают одновременное срезание, сбор и измельчение стеблей кукурузы, подсолнечника, камыша и веток с целью дальнейшей заделки в почву, разбрасывания по ее поверхности или сбора для животноводства.

Поэтому обоснование конструктивно-технологической схемы, определение параметров и режимов работы универсального срезающе-измельчающего аппарата является актуальной задачей.

Вопросы теоретического обоснования срезания, сбора и измельчения одним аппаратом различных культур до конца не решены. Необходимо обосновать структурно-функциональную схему агрегата для срезания и измельчения растений, провести исследования по обоснованию физической сути показателя кинематического режима.

Проблема состоит в отсутствии конструктивно-технологической схемы, параметров и режимов работы срезающе-измельчающего режущего аппарата, обеспечивающего одновременный срез, сбор и измельчение стеблей.

Цель исследования – повышение эффективности среза и измельчения растений путем обоснования структурно-функциональной схемы агрегата, рациональных параметров и режимов работы режущего аппарата.

Обзор литературы

Современные устройства содержат различные элементы для среза и измельчения стеблей: ножи, цепные элементы, молотки. При этом они обеспечивают срез узкого диапазона культур (толстостебельных или тонкостебельных) с ограниченной универсальностью использования. Отсутствуют режущие аппараты, совмещающие вращательное движение шнека среза.

Выполнен обзор имеющихся конструкций косилок, кормо- и зерноуборочных комбайнов, мульчировщиков, измельчителей¹, некоторые из которых представлены на рисунке 1.

¹ АгроБаза [Электронный ресурс]. URL: https://www.agrobase.ru/catalog/machinery/machinery_1fb07c04-79b4-441b93a1-ffc217988fae (дата обращения: 01.08.2023).



Р и с. 1. Косилки-измельчители, плющилки и мульчировщики слева направо верхний ряд: КДП-310; КРС-1,4; роторная КИР-1,85М; КИН-Ф-1500; слева направо нижний ряд: с цеповым аппаратом MU-LW; молотковая; SEPPi SMO pick-up; MasterCut

F i g. 1. Reaper-chopper, conditioners and mulchers from left to right in the top row: KDP-310; KRS-1,4; rotor KIR-1,85M; KIN-F-1500; from left to right in the bottom row: chain machine MU-LW; hammer; SEPPi SMO pick-up; MasterCutt

Также проведен обзор современных измельчителей стеблей, некоторые из которых представлены на рисунке 2.



Р и с. 2. Измельчители стеблей и растительных остатков слева направо: ИМС-2,4; ИРО-3,0; ИС-3; ЕФХ

F i g. 2. Stem and plant residue chopper from left to right: IMS-2.4; IRO-3.0; IS-3; EFX

В результате обзора был проведен анализ 50 протоколов испытаний косилок и косилок-плющилок по данным Государственного испытательного центра² на 10 машиноиспытательных станциях за 2015–2022 гг.³ (табл. 1).

Цель анализа – выявление существующих промышленных образцов режущих аппаратов с дополнительной возможностью измельчения стеблей, прошедших государственные испытания с заданными агротехническими требованиями.

Анализ протоколов испытаний показал:

– существующие машины преимущественно предназначены для выполнения одной или двух технологических операций одним рабочим органом (срез, плющение, измельчение);

² Государственный испытательный центр [Электронный ресурс]. URL: <http://sistemamis.ru> (дата обращения: 01.09.2023).

³ Алтайская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://altmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Владимирская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://vladmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Кировская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://kirovvmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Кубанская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kubbmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Поволжская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://www.povvmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023).

– срез с плющением обеспечивают дисковая косилка Krone Easy Cut 2800/1CV, косилка-плющилка TAARUP 433 2LT и Мещера Е-403; жатки Е-025, SH-309Т, Е-033; косилки-плющилки FC-303GC, КП-500; косилка роторная КРП-350-01;

– срез с измельчением – жатки ЖГР-4,5-1Е, КВК-6025.12-07; комбайн Ягуар 870; косилка-измельчитель КИР-1,5Н;

– отсутствуют универсальные режущие устройства, обеспечивающие одним аппаратом не только срез, но и сбор и измельчение срезанной массы.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Результаты анализа испытаний промышленных образцов
Results of the analysis of test reports

МИС / Machine testing stations	Название, марка, производитель / Name, brand, manufacturer	Культуры / Cultures	Плющение / Squashing	Измельчение, мм / Shredding, mm	Высота среза, см / Cutting height, cm	Ширина захвата, м / Working width, m	Рабочая скорость, км/ч / Working speed, km/h	Производительность, га/ч / Productivity, ha/h
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Алтайская / Altayskaya	Дисковая косилка Krone Easy Cut 2800/1CV, ООО «РУФ-2», г. Барнаул / disk mower Krone Easy Cut 2800/1CV, Ltd. “RUF-2”, Barnaul	Сеяные и естественные травы / seeded and natural grasses	да	нет	–	2	12	2,78
Владимирская / Vladimirskaya	Косилка-плющилка TAARUP 4332 LT, «Kverneland Group», Дания / mower conditioner TAARUP 4332 LT, “Kverneland Group”, Denmark		да	нет	6	3–3,5	12	3,8
Кубанская / Kubanskaya	Жатка для грубостебельных культур ЖГР-4,5-1Е, ОАО «Гомсельмаш», республика Беларусь, г. Гомель / reaper for coarse-stemmed crops ЖГР-4,5-1Е, “Gomselmash”, Republic of Belarus, Gomel	Сеяные и естественные травы / seeded and natural grasses	нет	20–30	–	4,2	7,8	2,4–3
Подольская / Podolskaya	Самоходная косилка-плющилка Мещера Е-403, ОАО «Егорьевский механический завод», Московская обл., г. Егорьевск / self-propelled mower-conditioner “Meshchera E-403”, “Egorievsky Mechanical Plant”, Moscow region, Egorievsk		да	нет	5,7	4,2	7,7	3,2

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Северо-Западная / Northwestern	Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5М, АО «Корммаш», п. Орловский Ростовской области / rotary mower-shredder КИР-1,5М, “Kormmash”, Orlovsky, Rostov region	Сеяные и естественные травы, кукуруза, подсолнечник / seeded and natural grasses, corn, sunflower	нет	22–61	9	1,47	7,3	13,4 т/ч

Проведен анализ теоретическо-экспериментальных исследований ряда авторов в данной области.

Режущий аппарат, содержащий шнек, изучен в работе Т. П. Погорова [1]. Представлено теоретическое обоснование устройства, а Н. В. Алдошин предложил режущий аппарат, снабженный сегментами без лезвий, и модернизированный сегментно-пальцевый аппарат [2; 3].

В статье В. В. Красовского обоснованы параметры и режимы работы аппарата для среза растений, которые произрастают в садах и виноградниках [4].

В. А. Гулевский и А. А. Вертий в работах [5; 6] усовершенствовали технологию для измельчения стеблей в кормопроизводстве. Предложили измельчитель, содержащий шарнирные подвешенные комбинированные ножи, выполнили математическое моделирование измельчителя.

В публикациях ученые анализируют разные типы аппаратов: например, конструкции измельчителей концентрированных кормов [7], шнековый режущий аппарат подпорного и бесподпорного среза тонко- и толстостебельных культур [8; 9; 10], дисковый ротационный режущий аппарат, установленный на кукурузоуборочном комбайне [11] и др.

В зарубежной работе [12] предложены косилки-измельчители с вертикальными и горизонтальными шнеками для резания кустарников и веток.

В исследовании таких авторов как Х. Ган, С. Матанкер, А. Момин, Б. Кунс, Н. Стоффел, А. Хансен, Т. Грифт [13] сравнивалось резание тремя сегментами (прямое лезвие 0°, лезвие под углом 30° и зубчатое). При использовании угловых или зубчатых лезвий оператор может поддерживать высокую скорость машины, что приводит к значительному увеличению производительности.

Встречаются зарубежные исследования измельчения и перемешивания стеблей для кормов в животноводстве. В работе китайских ученых [14] рассмотрен анализ процесса замешивания и нарезки стебля солодки в горизонтальном смесителе шнекового типа смешанного рациона.

Фундаментальные исследования работы шнековых питателей отражены в работе Ю. Юнцин⁴, однако, данные устройства не позволяют работать на уборочных машинах.

Исследования работы срезающе-измельчающего режущего аппарата шнекового типа в зарубежных работах нами не обнаружены.

Несмотря на существующие исследования вопросы теоретического обоснования срезания, сбора и измельчения одним аппаратом различных культур до конца

⁴ Yu Y. Theoretical Modelling and Experimental Investigation of the Performance of Screw Feeders. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree of doctor of philosophy. 1997. 254 p. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2601&context=theses> (дата обращения: 01.09.2023).

не решены. Отсутствует комплексный подход к структурно-функциональной схеме машины. Необходимо обосновать структурно-функциональную схему агрегата для срезания и измельчения растений, провести исследования по обоснованию физической сути показателя кинематического режима.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи в лаборатории кафедры эксплуатации и технического сервиса Кубанского государственного аграрного университета было проведено изучение подпорного и бесподпорного среза стеблей подсолнечника, кукурузы, камыша, веток на экспериментальной установке (рис. 3), которая позволяла изменять частоту вращения и высоту расположения шнека, скорость подачи, шаг и междурядье стеблей.



Р и с. 3. Варианты лабораторной установки для изучения резания и измельчения стеблей: бесподпорного (а) и подпорного (б) среза

F i g. 3. Variants of a laboratory setup for studying stem cutting and chopping: unsupported (a) and supported (b) cutting

Лабораторные исследования выполнялись в варианте бесподпорного среза (рис. 3а), подпорного среза с противорежущей пластиной (рис. 3б), в трех вариантах подпорного среза с противорежущими сегментами (рис. 4).



Р и с. 4. Варианты лабораторной установки подпорного среза слева направо:

а – спаренные сегменты, расположенные смежно с углом 90° ;

б – угол наклона противорезов в горизонтальной плоскости 30° ;

с – расстояние между режущим и противорежущими элементами 5 мм

F i g. 4. Variants of the laboratory setup of the retaining shear from left to right:

а – paired segments arranged adjacent to 90° angle; б – angle of contra-trails in the horizontal plane 30° ;

с – distance between cutting and contra-trails 5 mm

В результате анализа существующей информации, проведения лабораторных исследований, отсева несущественных факторов были выбраны значения для планирования эксперимента, которые представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Значения параметров и уровни изменения значений
Values of parameters and levels of variation of values

Изменение значений / Change of values	Значения параметров / Parameter values		
	Частота вращения шнеково-го рабочего органа, $n_{\text{шн.}}(x_1)$, мин ⁻¹ / rotation frequency of auger working body, $n_{\text{шн.}}(x_1)$, min ⁻¹	Угол наклона режущей части сегментного ножа, $\alpha_c(x_2)$, град / angle of inclination of the cutting part of the segment knife, $\alpha_c(x_2)$, deg	Шаг установки сегментов по винтовой кромке, $l_c(x_3)$, мм / pitch of screw edge segments, $l_c(x_3)$, mm
+1	1170	80	300
0	850	60	180
-1	530	40	60

В полевых условиях было проведено планирование эксперимента при уборке подсолнечника (рис. 4).



Р и с. 5. Полевая экспериментальная установка

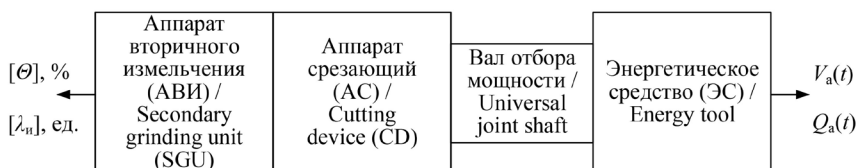
F i g. 5. Field experimental device

В лабораторных исследованиях предусматривалось изучение среза и измельчения тонко- и толстостебельных культур на стационарной установке с определением качественных показателей среза и измельчения, а также параметров и режимов работы срезаше-измельчающего аппарата.

Для полевых исследований был выбран многофакторный эксперимент для обоснования рациональных параметров и режимов предложенного устройства.

Результаты исследования

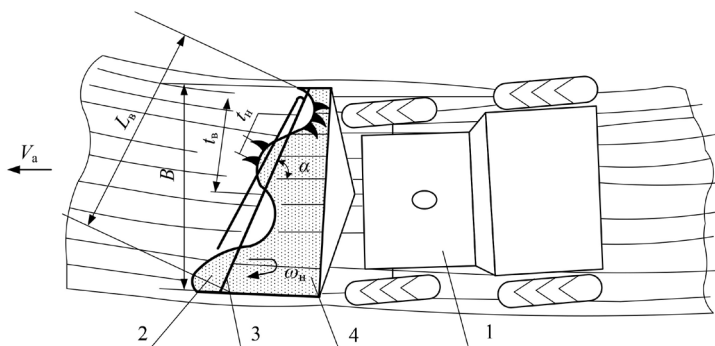
На рисунке 6 представлена структурно-функциональная схема измельчающего агрегата с режущим аппаратом срезающе-измельчающего типа, включающая энергетическое средство, срезающий аппарат и устройство вторичного измельчения.



Р и с. 6. Структурно-функциональная схема агрегата

F i g. 6. Structural and functional diagram of the unit

Схема агрегата представлена на рисунке 7.



Р и с. 7. Схема агрегата: 1 – энергетическое средство; 2 – винт измельчителя; 3 – вал винта; 4 – стеблестой; L_a – длина вала винта; t_e – шаг винтов; t_n – шаг ножей; B – ширина захвата; α – угол атаки; ω_n – угловая скорость ножей

F i g. 7. Scheme of the unit: 1 – power tool; 2 – chopper screw; 3 – screw shaft; 4 – stalk; L_a – screw shaft length; t_e – screw pitch; t_n – knife pitch; B – width of grasp; α – angle of attack; ω_n – angular velocity of knives

При рассмотрении взаимодействия стеблей, размещенных в рядках (кукуруза, подсолнечник) или условных рядках (камыш), и ножей, размещенных по винтовой линии шнека с определенным шагом (в проекции на поверхность поля), возникает необходимость оценки интенсивности такого взаимодействия.

Для описания данного процесса примем, что количество стеблей во всех рядках по ширине захвата агрегата B равно – M_1 , а количество ножей по длине винтовой линии равно M_2 на площади $B \times L_0$, где L_0 – расстояние, которое проезжает агрегат за время – t_i .

Определим количество стеблей Z_q через какой-то промежуток времени работы агрегата – T , а число ножей, обеспечивающих срез, обозначим Z_2 . Оценим возможность взаимодействий стеблей и ножей за малый промежуток времени Δt . Количественное изменение числа стеблей ΔZ_1 определяется их срезом (случайная величина).

За промежуток времени, равный Δt , каждый из ножей Z_2 обеспечивает $X_2 \cdot \Delta t$ фактических срезов, где $X_2 = \xi \cdot \rho_2$ – средняя интенсивность появления ножей в области нахождения стеблей в единицу времени, а ρ_2 – вероятность среза конкретным ножом конкретного стебля из всего их множества в рядке на элементарной площади ΔS , ξ – число ножей за t .

В этой связи имеем равенство:

$$\Delta Z_1 = -X_2 \cdot Z_2 \cdot \Delta t, \quad (1)$$

а его дифференциальное уравнение может быть представлено как:

$$\frac{dZ_1}{dt} = -X_2 \cdot Z_2. \quad (2)$$

По аналогии имеем также, что

$$\frac{dZ_2}{dt} = -X_1 \cdot Z_1. \quad (3)$$

Это система дифференциальных уравнений при начальных условиях $Z_1(0) = M_1$ и $Z_2(0) = M_2$.

Дифференцирование и соответствующая замена дает следующее уравнение:

$$\frac{d^2 Z_1}{dt^2} = X_1 \cdot X_2 \cdot Z_1. \quad (4)$$

Общим решением данного уравнения является:

$$Z_1 = C_1 \exp \sqrt{X_1 \cdot X_2} \cdot T + C_2 \exp \left(-\sqrt{X_1 \cdot X_2} \cdot T \right). \quad (5)$$

При использовании гиперболических функций имеем:

$$Z_1 = C_3 \operatorname{ch} \left[(X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T \right] + C_4 \operatorname{sh} \left[(X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T \right]. \quad (6)$$

На основании дифференцирования получаем, что

$$Z_2 = -C_3 \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^{0,5} \cdot \operatorname{sh} (X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T - C_4 \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^{0,5} \cdot \operatorname{ch} (X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T. \quad (7)$$

При принятых выше начальных условиях определим значения постоянных:

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= M_1; \\ C_4 &= - \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{0,5} \cdot M_2 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

На основании этого можно записать, что

$$Z_1 = M_1 \cdot \operatorname{ch} (X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T - M_2 \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{0,5} \cdot \operatorname{sh} (X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T. \quad (9)$$

$$Z_2 = -M_1 \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^{0,5} \cdot sh(X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T + M_2 \cdot ch(X_1 \cdot X_2) \cdot T. \quad (10)$$

Для упрощения данных зависимостей перейдем от абсолютных значений к относительным через доли:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= \frac{Z_1}{M_1}; \\ \Psi_2 &= \frac{Z_2}{M_2} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Разделив правые и левые части уравнений на M_1 и M_2 , получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_1}{dt} &= -X_2 \cdot \frac{M_2}{M_1} \cdot \Psi_2; \\ \frac{d\Psi_2}{dt} &= -X_1 \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \Psi_1 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Интегрирование уравнений системы при $\Psi_1 = \Psi_2 = 1$ и $T = 0$ с заменой:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= X_1 \cdot \frac{M_1}{M_2}; \\ \gamma_2 &= X_2 \cdot \frac{M_2}{M_1} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

В результате этого получим, что

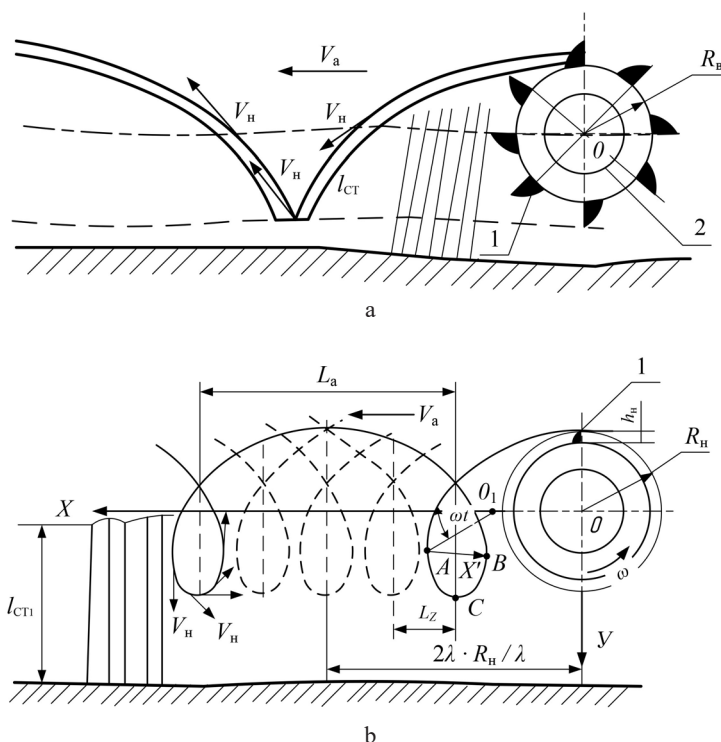
$$\left. \begin{aligned} d\Psi_1 &= -\gamma_2 \cdot \Psi_2; \\ d\Psi_2 &= -\gamma_1 \cdot \Psi_1 \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Физический смысл γ_1 и γ_2 состоит в том, что они показывают интенсивность взаимодействия какого-либо количества ножей срезающе-измельчающего аппарата с каким-либо количеством стеблей на определенном участке определенной площади за промежуток времени, равный Δt_i с определенной вероятностью – ρ_2 . Данный факт подтверждается тем, что взаимодействие стеблей одиночных (зерновые) и разветвленных (камыш) с ножами аппарата осуществляется по циклоидальной кривой. Такая кривая может быть укороченной (рис. 8а), с параметрами

$$\lambda = \frac{V_n}{V_a} = 1, \quad (15)$$

где V_n , V_a – соответственно линейные скорости ножей и агрегата, или удлиненной (рис. 8б):

$$\lambda \gg 1. \quad (16)$$



Р и с. 8. Схема к обоснованию показателя кинематического режима:
 а – схема движения лезвия ножа по укороченной траектории при $\lambda = 1$;
 б – схема движения лезвия ножа при $\lambda \gg 1$

F i g. 8. Scheme to substantiate the kinematic mode parameter:
 а – scheme of knife blade motion along the shortened trajectory at $\lambda = 1$;
 б – scheme of knife blade motion at $\lambda \gg 1$

Решение системы уравнений (14) путем замены переменных дает следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= ch(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T - \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^{0,5} \cdot sh(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T; \\ \Psi_2 &= ch(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T - \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)^{0,5} \cdot sh(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Рассмотрим результаты подпорного среза стеблей с возможностью дополнительного измельчения (табл. 3).

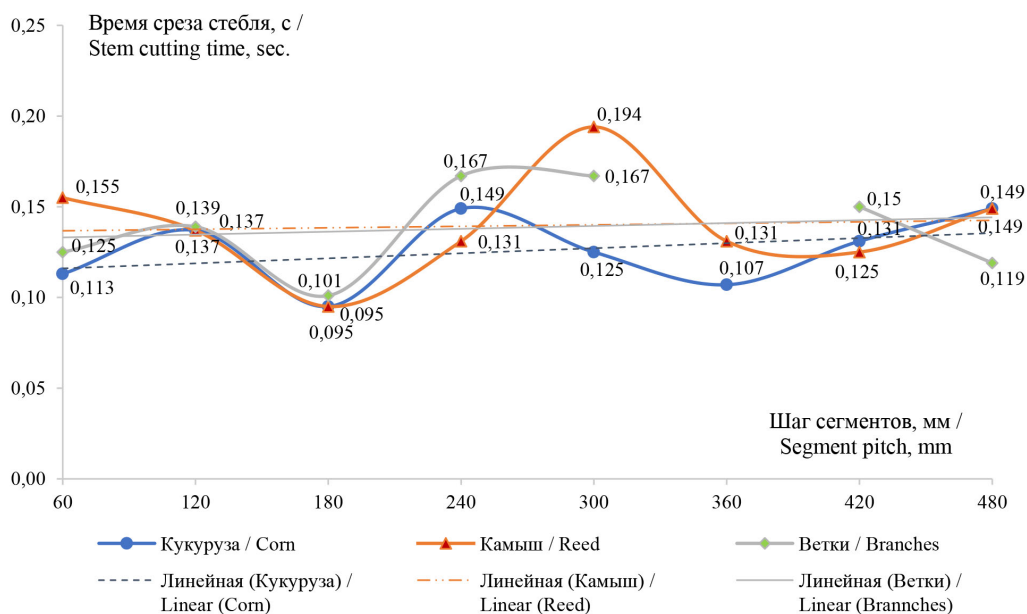
Наилучшие результаты получены при использовании варианта 1 (рис. 4).

Минимальное значение времени среза стеблей t_{cp} при шаге установки сегментов по винтовой кромке $l_c = 180$ мм в случае с кукурузой составило 0,095 с; с камышом – 0,095 с; с ветками – 0,101 с. При этом $t_{cp} = 0,095$ –0,194 с (рис. 9).

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Длина стеблей после среза и измельчения стеблей камыша, мм
Length of stems after cutting and crushing of reed stems, mm

Вариант / Option	Показатели статистики / Statistics indicators				
	$\bar{X}$, мм	S , мм	v , %	$S_{\bar{X}}$, мм	$S_{\bar{X}}$ %
1	106	59	55	4	4
	90	59	65	5	5
	83	54	65	5	6
2	126	57	45	6	4
3	152	54	36	6	4



Р и с. 9. Зависимость « $t_{cp} - l_c$ »

F i g. 9. Dependence « $t_{cp} - l_c$ »

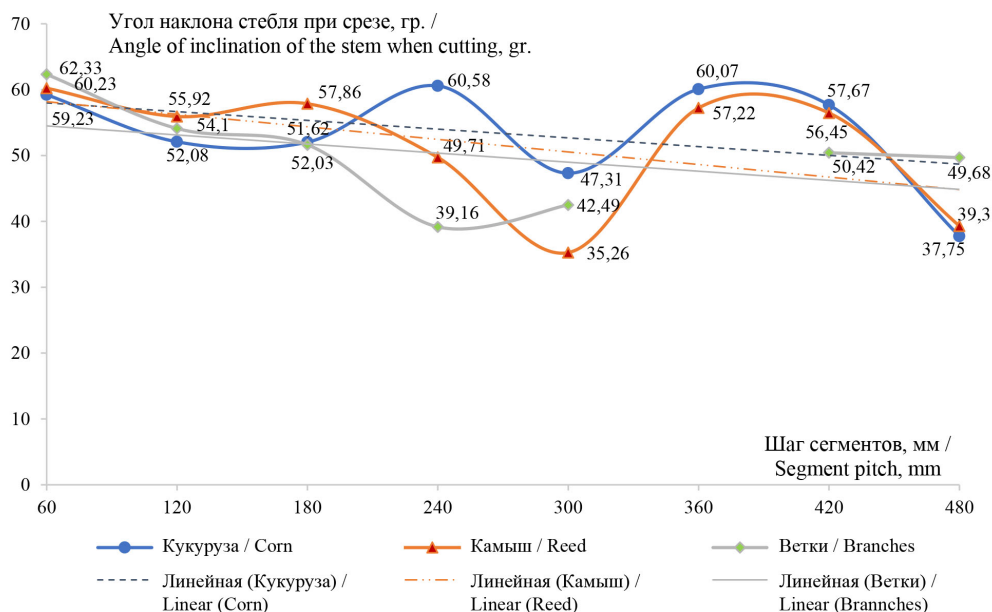
Максимальные значения угла наклона стебля при срезе $\alpha_{ст}$ при $l_c = 240, 360$ мм – 60° , для камыша при $l_c = 60$ мм – 60° , веток при $l_c = 60$ мм – 62° (рис. 10).

На первом этапе полевых исследований изучался процесс работы агрегата с режущим аппаратом срезающе-измельчающего типа и его оценка по критерию удельных затрат энергии (энергоёмкости).

В общем виде искомая зависимость представлена следующим образом:

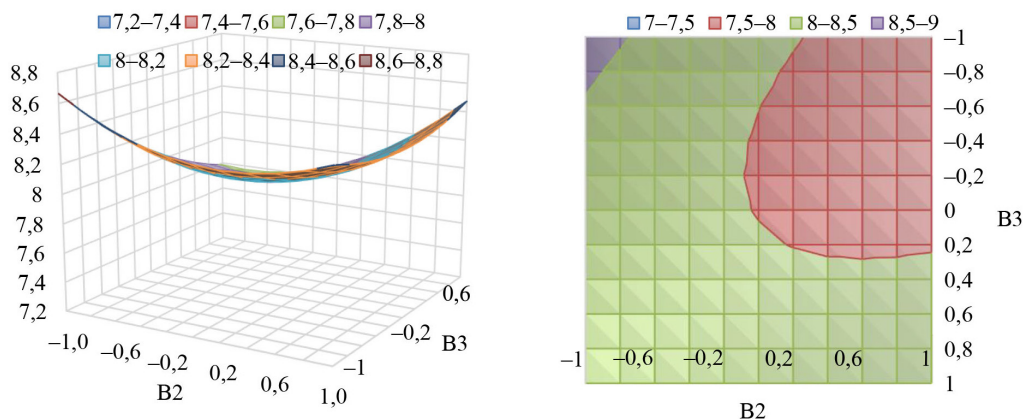
$$N_3 / \gamma_1 = f(n_{ш}; l_c; t_{np}) \rightarrow \min, \quad (18)$$

где N_3 / γ_1 – энергоёмкость процесса, кВт·с/кг; $\beta_1 / n_{ш}$ – частота вращения шнекового рабочего органа с режуще-измельчающими сегментами, мин⁻¹; β_2 / l_c – шаг установки сегментов по винтовой кромке шнека, мм; β_3 / t_{np} – шаг установки противорежущих сдвоенных сегментов, мм.

Р и с. 10. Зависимость « $\alpha_{ст} - l_c$ »F i g. 10. Dependence « $\alpha_{ст} - l_c$ »

Оптимальными значениями являются:

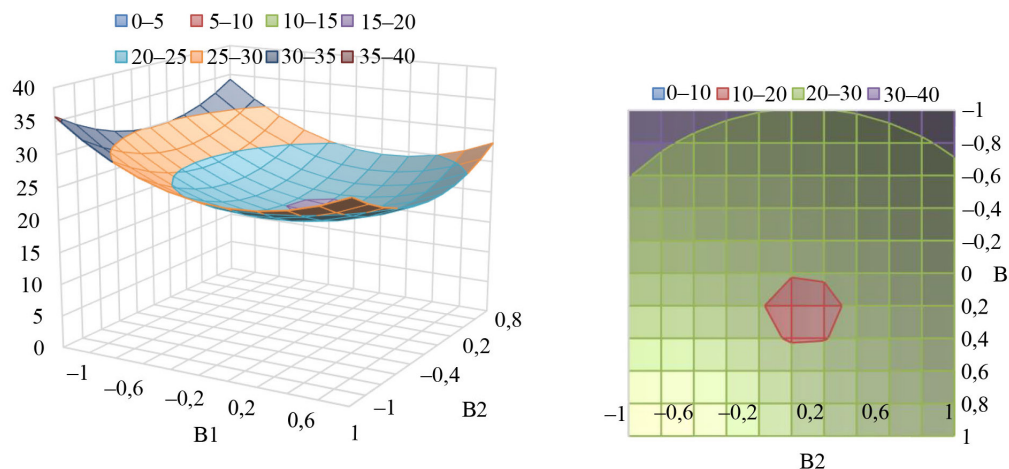
- частота вращения шнекового рабочего органа $n_{ш} = 849\text{--}850 \text{ мин}^{-1}$;
- шаг установки сегментов $l_c = 180 \text{ мм}$;
- шаг установки противорежущих сегментов $t_{пр} = 61,00$.

Р и с. 11. Графическое место точек для зависимости $\gamma_1 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$ F i g. 11. Graphical location of points for the dependence $\gamma_1 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$

На втором этапе исследований найдена искомая зависимость, общий вид которой представлен следующим выражением:

$$v_n / \gamma_2 = f(n_{ш}; l_A; \alpha_A) \rightarrow \min, \quad (19)$$

где v_n / γ_2 – неравномерность распределения частиц стеблестоя по полю, %; $\beta_1 / n_{ш}$ – частота вращения шнекового рабочего органа с режуще-измельчающими сегментами, мин^{-1} ; β_2 / l_c – шаг установки сегментов по винтовой кромке шнека, мм; β_3 / α_c – угол наклона режущей части сегментного ножа, градус.



Р и с. 12. Графическое место точек для зависимости $\gamma_2 = f(\beta_1; \beta_2; \beta_3 = 0) \rightarrow \min$
 F i g. 12. Graphical location of points for the dependence $\gamma_2 = f(\beta_1; \beta_2; \beta_3 = 0) \rightarrow \min$

На третьем этапе исследований проведена оценка работы СИА по трем критериям оптимизации с соответствующей совокупностью параметров:

$$v_4 / \gamma_3 = f(\lambda_k; l_A; t_{np}) \rightarrow opt; \quad (20)$$

$$\Pi / \gamma_4 = f(\lambda_k; l_A; t_{np}) \rightarrow opt; \quad (21)$$

$$\lambda_n / \gamma_5 = f(\lambda_k; l_A; t_{np}) \rightarrow opt, \quad (22)$$

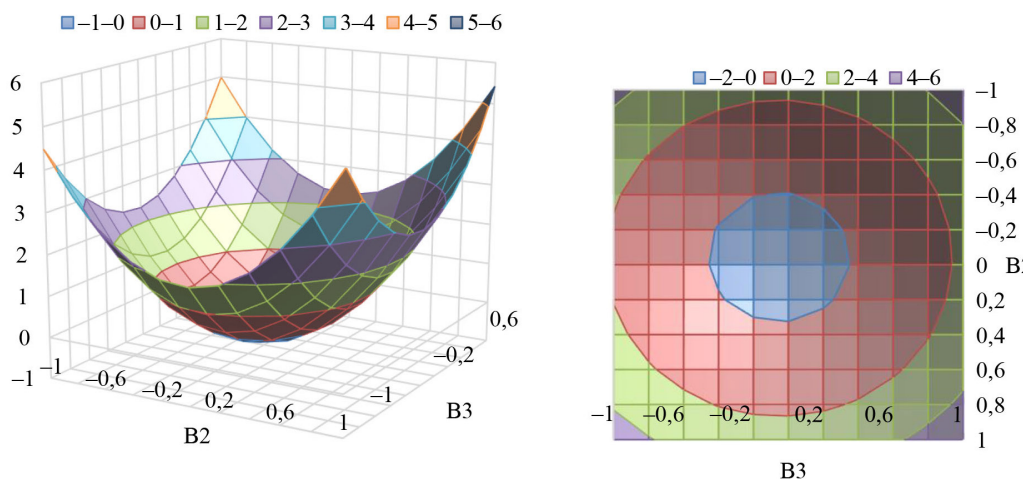
где v_4 – неоднородность частиц по длине, %; Π – показатель потерь в виде несрезанного стеблестоя, %; λ_n – степень измельчения стеблестоя, ед.; λ_k – показатель кинематического режима работы агрегата, ед.

Обсуждение и заключение

Обоснована структурно-функциональная схема измельчающего агрегата с режущим аппаратом срезюще-измельчающего типа.

Для принятых условий работы аппарата обоснована физическая суть так называемого показателя кинематического режима, характеризующего интенсивность взаимодействия какого-либо количества ножей с растениями на корню и распределенным по площади с различной плотностью стеблестоем, создана система уравнений.

В результате изучения резания стеблей в лабораторных условиях получено: по кукурузе: $\min t_{cp} = 0,095$ с при $l_c = 180$ мм; $\max l_c = 240$ мм ($60,58^\circ$), при $\min l_c = 480$ мм ($37,75^\circ$); по камышу: $\max t_{cp} = 0,095$ с при $l_c = 180$ мм; $\max l_c$ при $l_c = 60$ мм ($60,26^\circ$), при $\min l_c = 300$ мм ($35,26^\circ$).



Р и с. 13. Графическое место точек для зависимости $\gamma_4 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$
 F i g. 13. Graphical location of points for the dependence $\gamma_4 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$

Проведенными исследованиями по методике многофакторного эксперимента после соответствующей математической обработки установлено, что значениями параметров являются: $n_{ш} = 850,0 \text{ мин}^{-1}$; $l_c = 180,0 \text{ мм}$; $\alpha_c = 60,0^\circ$; $t_{пп} = 60,0 \text{ мм}$; $\lambda_k = 5,34 \text{ ед.}$

При которых: $N_s = 8,01 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг}$; $v_n = 18,2 \%$; $v_d = 14,5 \%$; $\Pi = 1,8 \%$; $\lambda_n = 3,51 \text{ ед.}$; $H_{ср} = 51,8 \text{ мм}$; $\zeta = 31,19 \%$.

Полученные данные необходимы для проектирования и конструирования машин предложенного типа.

Установлено, что в зависимости от параметра $n_{ш}$ (мин^{-1}) и показателя кинематического режима λ_k (ед.) мощность изменяется от 4,99 кВт до 11,022 кВт, производительность – от 0,5 кг/с до 1,22 кг/с, энергоемкость – от 11,022 до 4,99 кВт·с/кг.

Расхождение результатов, полученных теоретических и экспериментальных данных $Q_a = 1,0 \text{ кг/с}$, $v_n = 13,35 \text{ м/с}$, $v_a = 2,5 \text{ м/с}$ и $\lambda_k = 5,34 \text{ ед.}$, составляет, соответственно, $\delta_Q = \pm 0,5 \%$ и $\delta_N = \pm 6,4 \%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погоров Т. А., Лобанов Г. Л. Математическая модель траектории движения ножей шнекового режущего аппарата в зоне резания стеблей растений // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2017. № 1 (13). С. 207–216. URL: <https://clck.ru/36raQK> (дата обращения: 01.05.2023).
2. Алдошин Н. В. Режущий аппарат с сегментами без лезвий // Материалы междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 3–7. EDN: [KMDFEY](#)
3. Алдошин Н. В., Лылин Н. А. Модернизированный сегментно-пальцевый режущий аппарат // Материалы международного конгресса: материалы для обсуждения. 2017. С. 174–175. EDN: [FCBLVL](#)
4. Красовский В. В. Экспериментальные исследования параметров и режимов работы косилки для скашивания сидератов в междурядьях садов и виноградников // Сборник тезисов участников V науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых. 2019. С. 80–82. EDN: [EGDPDR](#)
5. Гулевский В. А., Вертий А. А. Усовершенствование технологии измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Вестник

Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 1 (60). С. 73–81. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.73>

6. Гулевский В. А., Вертий А. А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (18). С. 120–128. EDN: [VMNYNQ](#)

7. Вольвак С. Ф., Шаповалов В. И. Исследование процесса измельчения концентрированных кормов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. № 4 (36). С. 14–24. EDN: [KSSZAW](#)

8. Труфляк И. С. Теоретическое обоснование резания стеблей шнековым режущим аппаратом // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101. С. 2282–2297. EDN: [SZVWTT](#)

9. Труфляк И. С. Жатка зерноуборочного комбайна нового типа // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101. С. 2298–2310. EDN: [SZVWXP](#)

10. Труфляк И. С., Трубилин Е. И. Новый режущий аппарат косилок // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. 2012. № 101. С. 370–371. EDN: [SWYSHF](#)

11. Исследование ротационного режущего аппарата / А. Е. Матушенко [и др.]. // Теория и практика финансово-хозяйственной деятельности предприятий различных отраслей. 2021. С. 478–482. EDN: [EGDETK](#)

12. Ehlert D., Pecenka R., Wiehe J. New Principle of a Mower-Chipper for Short Rotation Coppices // Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy. 2012. p. 332–336. <https://doi.org/10.15150/lt.2012.330>

13. Effects of Three Cutting Blade Designs on Energy Consumption During Mowing-conditioning of Miscanthus Giganteus / H. Gan [et al.] // Biomass and Bioenergy. 2018. Vol. 109. p. 166–171. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953417304543> (дата обращения: 01.05.2023).

14. Power Consumption Analysis and Experimental Study on the Kneading and Cutting Process of Licorice Stem in Horizontal Total Mixed Ration Mixer / W. Li [et al.] // Processes. 2021. Vol. 9, Issue 12. <https://doi.org/10.3390/pr912108>

*Поступила в редакцию 21.04.2023; поступила после рецензирования 30.05.2023;
принята к публикации 10.06.2023*

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

Потебня Андрей Николаевич, аспирант Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2899-6564>, panpotap76@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

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

А. Н. Потебня – обзор литературы, участие во всех этапах полевых исследований, обработка полученных экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Pogorov T.A., Lobanov G.L. Mathematical Model of a Screw Cutter Knife Trajectory in the Cutting Zone of Plant Stems. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2017;(1):207–216. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/36raQK> (accessed 01.09.2023).



2. Aldoshin N.V. Cutting Machine With Segments without Blades. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2019;3–7. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [KMDFEY](#)
3. Aldoshin N.V., Lylin N.A. Modernization of the Segmented Finger Cutter. In: Proceedings of the International Congress: Materials for Discussion. 2017;174–175. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [FCBLVL](#)
4. Krasovsky V.V. Experimental Studies of Parameters and Modes of Operation of the Mower for Mowing Green Manure in the Inter-Row Orchards and Vineyards. In: Collection of Abstracts of Participants of the 5th Scientific-Practical Conference of Professors, Graduate Students, Students and Young Scientists. 2019;80–82. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [EGDPDR](#)
5. Gulevsky V.A., Vertiy A.A. Improvement of Rough Stalk Fodder Chopping Technology by a Chopper With Articulated Combined Knives. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*. 2019;12(1):73–81. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.73>
6. Gulevsky V.A., Vertiy A.A. Mathematical Modeling of a Fodder Chopper Operation. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*. 2018;18(3):120–128. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [VMNYNQ](#)
7. Volvak S.F., Shapovalov V.I. Study of the Process of Grinding of Concentrated Fodder. *Innovations in the Agroindustrial Complex: Problems and Prospects*. 2022;(4):14–24. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [KSSZAW](#)
8. Truflyak I.S. Theoretical Substantiation of Stem Cutting by Auger Cutting Apparatus. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2014;(101):2282–2297. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SZVWTT](#)
9. Truflyak I.S. Reaper of a Combine Harvester of a New Type. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2014;(101):2298–2310. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SZVWXP](#)
10. Truflyak I.S., Trubilin E.I. New Cutting Apparatus of Mowers. *Scientific Support of Agroindustrial Complex*. 2012;(101):370–371. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SWYSHF](#)
11. Matushchenko A.E., Poluektov A.A., Vulshinskaya I.V., Glazkov D.V. Investigation of Rotary Cutting Unit. Theory and Practice of Financial and Economic Activity of Enterprises in Various Industries. In: Science and Society: Current Problems and Solutions. 2021;478–482. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [EGDETK](#)
12. Ehlert D., Pecenka R., Wiehe J. New Principle of a Mower-Chipper for Short Rotation Coppices. In: Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy. 2012;332–336. <https://doi.org/10.1515/lt.2012.330>
13. Gan H., Mathanker S., Momin M.A., Kuhns B., Stoffel N., Hansen A., et al. Effects of Three Cutting Blade Designs on Energy Consumption During Mowing-Conditioning of *Miscanthus Giganteus*. *Biomass and Bioenergy*. 2018;109:166–171. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953417304543> (accessed 01.09.2023).
14. Li W., Wen B., Song P., Shi Y., Zhang J., Li J., et al. Power Consumption Analysis and Experimental Study on the Kneading and Cutting Process of Licorice Stem in Horizontal Total Mixed Ration Mixer. *Processes*. 2021;9(12):2108. <https://doi.org/10.3390/pr9122108>

Submitted 21.04.2023; revised 30.05.2023; accepted 10.06.2023

About the authors:

Evgeniy V. Truflyak, Dr.Sci. (Engr.), 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 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>, Researcher ID: D-1301-2018, trufliak@mail.ru

Andrey N. Potebnya, Postgraduate Student, Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2899-6564>, panpotap76@mail.ru

Authors contribution:

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

A. N. Potebnya – literature review, participation in all stages of field research, processing experimental data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.



Влияние процессов вспушивания ленты стеблей льна на структурные параметры слоя

А. Н. Зинцов¹, М. М. Ковалев²✉, Г. А. Перов², М. Г. Перов²,
В. А. Добрецов¹

¹ Костромская государственная сельскохозяйственная академия
(пос. Караваево, Российская Федерация)

² Федеральный научный центр лубяных культур
(г. Тверь, Российская Федерация)

✉ m.kovalev@fncl.ru

Аннотация

Введение. Эффективность выделения длинного льноволокна из тресты во многом зависит от структурных параметров слоя стеблей. Современные вспушиватели лент льна создают хаотичные перекосы и перекрещивания слоя стеблей под подбирающим барабаном. Указанные недостатки существующих машин минимизированы в опытном вспушивателе, в котором слой стеблей перемещается над подбирающим барабаном с показателем кинематического режима, равным единице.

Цель статьи. Изыскание средств и методов сохранения структурных параметров слоя стеблей при вспушивании лент льнотресты.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проведены по имеющимся и разработанным методикам, а анализ льноволокна – по действующим ГОСТам. Опыты проводили на лентах, сформированных льноуборочным комбайном ЛК-4А. После прорастания лент стеблей травой выполняли их вспушивание серийной машиной ВЛ-3 и опытным вспушивателем. При этом в каждом варианте производили необходимые замеры основных структурных параметров ленты стеблей и отбор проб до прохода агрегата и после вспушивания ленты. Результаты замеров и анализа проб обрабатывали методами математической статистики.

Результаты исследования. Установлено, что во всех вариантах опыта сохранились макроизгибы исходной и обработанных лент. При этом диапазон колебаний кривизны ленты льна за пределами частот среза расширился в 2–3 раза под воздействием рабочих органов серийной ворошилки ВЛ-3. Хаотичность указанных пульсаций была обусловлена увеличением перекосов, перекрещиваний и растянутости стеблей в ленте на 6,0° и 6,9 % соответственно. Вместе с тем опытный образец вспушивателя произвел наименьшие изменения структурных параметров слоя стеблей. Технологическая оценка льнотресты подтвердила преимущества опытного вспушивателя в сравнении с серийным ВЛ-3, у которого средняя выработка длинного волокна выше на 0,65 % и 0,5 единицы.

Обсуждение и заключение. Анализ полученных результатов свидетельствует о целесообразности вспушивания ленты льна путем подбора и перемещения стеблей над подбирающим барабаном с показателем кинематического режима, равным единице.

Ключевые слова: лен-долгунец, стебли, льнотреста, ворошение, вспушивание, структурные параметры слоя

© Зинцов А. Н., Ковалев М. М., Перов Г. А., Перов М. Г., Добрецов В. А., 2023



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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Для цитирования: Влияние процессов вспушивания ленты стеблей льна на структурные параметры слоя / А. Н. Зинцов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 542–557. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>

Original article

Influence of the Processes of Fluffing the Flax Stem Strips on the Structural Parameters of the Layer

A. N. Zintsov^a, M. M. Kovalev^b✉, G. A. Perov^b, M. G. Perov^b, V. A. Dobretsov^a

^a *Kostroma State Agricultural Academy
(Karavaevo, Russian Federation)*

^b *Federal Research Center for Bast Crops
(Tver, Russian Federation)*

✉ m.kovalev@fncll.ru

Abstract

Introduction. The efficiency of separating long flax fiber from the flax straw largely depends on the structural parameters of the layer of flax stems. Modern fluffers for flax strips create random distortions and intersection of the layer of flax stems under the pick-up drum. These disadvantages of existing machines are minimized in an experimental fluffer, in which a layer of flax stems moves over the pick-up drum with a kinematic mode indicator equal to one.

Aim of the Article. The study is aimed at finding means and methods for preserving the structural parameters of the layer of flax stems when fluffing flax straw strips.

Materials and Methods. Experimental studies were carried out according to existing and newly developed methods, and the analysis of flax fiber was carried out according to the current GOST standards. The experiments were carried out on the flax strips formed by the LC-4A flax harvester. After grass sprouted through the strips of flax stems, they were fluffed with the serial machine VL-3 and an experimental fluffer. For each variant, the necessary measurements of the main structural parameters of the stem strip and collection of samples for analysis were made before the unit passed and after fluffing the flax stem strip. The results of measurements and processing of samples were processed using the methods of mathematical statistics.

Results. It was found that macro-bends of the original and processed flax strips were in all the experiments. At the same time, the range of changes in the curvature of the flax strip outside the cutoff frequencies expanded 2.3 times under the influence of the working tools of the serial tedder VL-3. The randomness of these pulsations was caused by an increase in the distortion and elongation of the flax stems in the strip by 6.0° and 6.9%, respectively. At the same time, the experimental fluffer produced the smallest changes in the structural parameters of the flax stem layer. The technological evaluation of the flax straw confirmed the advantages of the experimental fluffer in comparison with the serial VL-3, which has an average production of long fiber higher by 0.65% and 0.5 units of number.

Discussion and Conclusion. The analysis of the obtained results indicates the practicability of fluffing flax strips by picking up and moving the stems from above the pick-up drum with its kinematic mode index equal to one.

Keywords: long-fibred flax, stalks, flax straw, tedding, fluffing, layer structural parameters

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

Funding: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment for the Federal Scientific Center for Bast Crops (No. FGSS-2022-0005).

For citation: Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A., Perov M.G., Dobretsov V.A. Influence of the Processes of Fluffing the Flax Stem Strips on the Structural Parameters of the Layer. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):542–557. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>

Введение

Научные исследования показывают, что приготовление льняной тресты в естественных условиях путем росной мочки – достаточно сложный биомеханический процесс, подверженный влиянию множества случайных факторов [1–3]. При этом одна группа факторов положительно воздействует на характер протекания процесса мацерации, а другая – затягивает вылежку до поздних сроков с заметным сокращением выхода и ухудшением качества волокнистой продукции. К условиям, задерживающим процесс приготовления тресты, следует отнести обильные осадки и низкую температуру воздуха в период уборки, высокую урожайность волокнистой продукции и наличие сорной растительности и трав [4–6]. В отдельных случаях при неблагоприятной комбинации указанных факторов плотные ленты стеблей прибиваются дождями к почве, сильно увлажняются и порастают травой. Фильтрация воздуха в нижних слоях такой ленты отсутствует, что способствует активизации процессов гниения стеблей в ленте и возникновению опасности потери всей волокнистой части урожая. Поэтому при организации уборочных процессов с целью сохранения возможной прибыли следует максимально уменьшать влияние обозначенных условий¹ [6–8].

Мировая практика показывает, что в процессе приготовления тресты наиболее эффективным методом борьбы с переувлажнением слоя стеблей, контактирующего с поверхностью почвы, является периодическое оборачивание, ворошение или впусивание лент стеблей [9–11]. Последний прием обладает существенными преимуществами, состоящими в технологической и технической простоте выполнения операции, высокой производительности и надежности существующих ворошилок ВЛ-2, ВЛ-3, впусивателей ВЛН-4,5 и др. [15–17]. Поэтому подавляющее большинство производителей отдадут предпочтение впусиванию лент стеблей. Однако, наряду с положительными отличиями, все современные машины заметно ухудшают структурные параметры слоя стеблей, снижая его пригодность для эффективной реализации процесса выделения длинного волокна из тресты на льнозаводе [18; 19]. Указанный недостаток является следствием принципа работы наиболее известных впусивателей, в которых подбирающий барабан производит впусивание тресты с хаотичным смещением различных участков растений в направлении движения агрегата. Это вызывает перекосы и перекрещивания, а также увеличивает растянутость стеблей в ленте. Кроме того, неподбор слоя стеблей указанными машинами достигает 10 % [8]. Исключением из обозначенного ряда машин являются впусиватели ТПЛ-1 (В-1), в которых подобранная лента стеблей перемещается над подбирающим рабочим органом [7]. Такой способ реализации

¹ Колчина Л. М., Крюков И. В. Технологии и технические средства для возделывания, уборки и первичной переработки льна-долгунца : Каталог-справочник. М. : ФГНУ Росинформагротех, 2003. 132 с.

вспушивания предполагает максимальное сохранение исходных структурных параметров слоя стеблей. Основной недостаток машины ТПЛ-1 (В-1) заключается в недостаточной полноте вспушивания при движении на повышенных скоростях. Для того, чтобы фактические показатели качества работы таких вспушивателей удовлетворяли агротехническим требованиям, необходимо снижать скорость движения агрегата. Низкая производительность машин ТПЛ-1 обусловлена также однопоточностью их конструкции [8].

С учетом существующей проблемы в Костромской государственной сельскохозяйственной академии и Федеральном научном центре лубяных культур проводятся исследования [9; 20] по обоснованию параметров и режимов работы вспушивателя лент льна с движением слоя стеблей над подбирающим барабаном, где показатель кинематического режима близок единице [8]. Усовершенствованный таким образом процесс вспушивания должен обеспечить максимальное сохранение исходных значений структурных параметров слоя стеблей, влияющих на выход длинного волокна [21]. Однако, несмотря на логичность приведенных рассуждений, достоверность обозначенной научной гипотезы до настоящего времени изучена недостаточно [9; 20].

Цель работы – поиск средств и методов сохранения структурных параметров слоя стеблей при вспушивании лент льнотресты.

Обзор литературы

Ворошение (далее – вспушивание) лент льна-долгунца – технологическая операция по отрыву стеблей от почвы с целью улучшения аэрации и рыхления без их переворачивания². Применяется в технологиях приготовления тресты лубяных культур в естественных условиях путем росяной мочки.

В льноводстве для вспушивания лент льнотресты используются различные методы и устройства, сведения о которых есть в исследованиях ученых.

В исследовании С. Б. Павлова³ обоснованы параметры и режимы работы ворошилок лент льна ВЛ-2 и ВЛ-3. Определена рациональная форма зуба, рабочая часть которого выполнена по дуге окружности, а прямолинейные его участки расположены радиально. Показано, что дугообразные зубья, перекатываясь по лентам, вначале тыльной стороной надавливают на стебли льна и только после этого, перекатываясь по ним, входят в ленту, что приводит к их повреждению, влияющим на выход длинного волокна. Исследованиями также подтверждено значительное перепутывание стеблей в ленте и увеличение их растянутости в слое, что является одной из главных причин низкого выхода длинного волокна при переработке тресты на льнозаводе [5]. Разработаны требования, которым должны отвечать вспушиватели лент льна.

Для повышения качества вспушивания различных по толщине и засоренности лент разработаны и обоснованы параметры механизма для одновременного поворота зубьев на дисках, обеспечивающего изменение угла их вхождения в слой стеблей [17].

В одном из рассмотренных нами исследований получено выражение, описывающее характер абсолютного перемещения диска с зубьями с учетом колебания оси вращения [21]. Определены пределы изменения кинематического режима ворошилки.

² ГОСТ Р 52784-2007. Лен-долгунец. Термины и определения. М., 2007.

³ Павлов С. Б. Обоснование технологического процесса и параметров рабочих органов для ворошения лент льна : дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 1993. 157 с.

Динамические особенности взаимодействия зубьев с лентой стеблей также рассмотрены ранее [22]. Показано, что для повышения эффективности работы впускивателя форма зубьев должна быть выполнена в форме эвольвенты. Обоснованы основные параметры и режимы работы аппарата безударного воздействия на ленту льна.

При реализации технологий уборки льна-долгунца эффективность применения средств механизации во многом зависит от качества сформированных и разостланных на льнище лент. Ученые Костромской государственной сельскохозяйственной академии провели статистические исследования по выявлению различных дефектов лент льна в целях эффективной профилактики их возникновения [8]. Для эффективной профилактики возникающих дефектов лент льна следует применять технические средства, выполняющие расстил лент принудительно и максимально близко к поверхности поля, выращивать незасоренные посевы культуры.

Анализ причин снижения выхода длинного волокна на льнозаводах позволил установить, что наиболее весомым фактором (с долей влияния свыше 50 %) является пониженная пригодность слоя стеблей льна к трепанию, обусловленная изменениями его структурных параметров, ухудшающихся главным образом на этапах уборки льна.

В результате научных изысканий разработана система требований, предъявляемых к слою стеблей для наиболее полного выделения длинного волокна при переработке тресты⁴:

- слой стеблей должен быть оптимально расположен относительно зажимных транспортеров трепальных машин, быть непрерывным и равномерным;
- стебли в нем должны быть подкомлеваны, иметь наименьшую угловую дезориентацию.

С учетом этих требований для эффективной переработки льнотресты на льнозаводе обозначены основные структурные параметры, характеризующие качество разостланных лент льна и влияющие на пригодность слоя к трепанию: кривизна ленты, растянутость, перекосы и перекрещивания стеблей в ней, а также разрывы лент стеблей⁵.

Исследованиями установлено, что увеличение растянутости стеблей по комлям до 0,3 м снижает пригодность слоя к обработке трепанием до 86 % [24]. Если стебли в таком слое дезориентированы до $\alpha = 45^\circ$, то пригодность падает до 75 %. В работах [25; 26] также отмечается, что только за счет уменьшения растянутости и устранения перекосов стеблей в слое путем прочеса можно увеличить выход длинного волокна на пять абсолютных процентов (или в среднем на 2,5 %).

Анализ работ по впускиванию лент льна показал, что имеется множество научных и опытно-конструкторских работ, в которых изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию параметров и режимов работы впускивателей, приведены конструкционные схемы и описаны их отличительные особенности [5; 8; 9].

Однако некоторые вопросы работы впускивателей в производственных условиях изучены недостаточно или не рассматривались вообще. Не проведена сравнительная оценка качества лент тресты, обработанных серийной машиной и опытными

⁴ Ипатов А. М. Теоретические основы механической обработки стеблей лубяных культур. М. : Легпромбытиздат, 1989. 137 с.

⁵ Баринов А. А. Разработка параметров системы управления расположением слоя стеблей при получении трепаного льняного волокна : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кострома, 2010. 15 с.

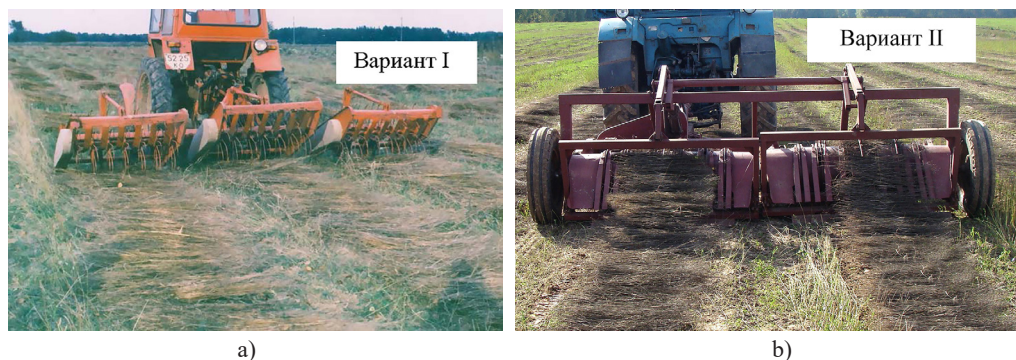
вспушивателями в производственных условиях. Не дана оценка влияния разных способов вспушивания на изменение структурных параметров ленты стеблей и выход длинного волокна.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели программа экспериментальных исследований предусматривала получение первичной информации в виде реализаций исследуемых процессов в производственных условиях опытного поля Костромской государственной сельскохозяйственной академии с последующей обработкой опытных данных методами математической статистики с помощью компьютерной программы STATGRAPHICS Plus 5.0. При этом вычисляли основные вероятностные характеристики процессов изменения структурных параметров ленты льна: математические ожидания – m , средние квадратические отклонения – s , коэффициенты вариации – V , нормированные корреляционные функции – $r(l)$, взаимные корреляционные функции – $r_{a-b}(l)$ и спектральные плотности – $S(w)$.

Для проведения опытов выбирали участки поля с выровненным микрорельефом и стеблестоем со следующей характеристикой: сорт «сурский» в желтой спелости; урожайность при нормированной влажности – льносоломой 4,1 т/га, семян – 0,42 т/га; средняя общая длина стеблей – 0,78 м; средний диаметр стеблей – 1,29 мм; густота стеблестоя – 1 410 шт/м²; зона расположения семенных коробочек – 0,21 м; влажность стеблей – 59,3 %, семенных коробочек – 47,9 %; масса травостоя – 20 г/м². Уборку посевов в опытах проводили в соответствии с ГОСТ 33734-2016⁶, оценку льнотресты по ГОСТ 53143-2008⁷, а льна трепаного согласно ГОСТ 53484-2009⁸.

Исследования проводили на лентах, разостланных по льнищу серийным льнокомбайном ЛК-4А, на рабочей скорости агрегата 2,5 м/с. Для создания условий необходимости вспушивания делали технологический перерыв для вылежки льнотресты и прорастания на ленте стеблей сорной растительности в течение трех недель. Для оценки качества тресты была принята ее лента, разостланная льнокомбайном (контрольный вариант III), и вспушенные серийной ворошилкой ВЛ-3 (вариант I) и опытным вспушивателем (вариант II) ленты в агрегатах с тракторами МТЗ-80 (рис. 1).



Р и с. 1. Ворошилка ВЛ-3 (вариант I) – а) и опытный вспушиватель (вариант II) – б) при проведении опытов

Fig. 1. The VL-3 tedder (option I) – a) and the experimental fluffer (option II) – b) during the experiments

⁶ ГОСТ 33734-2016. Техника сельскохозяйственная. Комбайны и машины для уборки льна. Методы испытаний. М., 2017.

⁷ ГОСТ 53143-2008. Треста льняная. Требования при заготовках. М., 2009.

⁸ ГОСТ 53484-2009. Лен трепаный. Технические условия. М., 2010.

При этом в каждом варианте производили замеры кривизны исходной и вспушенной лент льна, перекосов, растянутости и перекрещивания стеблей в ней, а также разрывов ленты до прохода агрегата (процесс а) и после ее вспушивания (процесс б).

Для регистрации процессов $Y_k(L)$ изменения кривизны исходной и вспушенной лент льна измеряли ординаты расположения комлевых частей Y_k слоя стеблей относительно базовой линии, в качестве которой использовали шнур длиной 20 м, натянутый в направлении движения агрегата на расстоянии 0,2 м от комлей в начале и конце каждого такого участка ленты.

Сбор информации для оценки влияния разных вспушивателей на процесс перекосов стеблей в ленте $\alpha(L)$ выполняли путем замера максимальных углов α отклонения стеблей от перпендикуляра к направлению движения агрегата. Поскольку разные направления перекосов стеблей одинаково негативно влияют на пригодность слоя к трепанию, то при выполнении замеров, в том числе и при отборе проб с перекрещиванием стеблей в ленте, фиксировали абсолютные значения показателя $-|\alpha|$.

В обоих случаях замеры производили в сечениях ленты с шагом дискретизации $\Delta L = 0,5$ м на десяти последовательно расположенных участках. Таким образом, общая длина L ансамбля реализаций в каждом варианте вспушивания составила 200 м ленты, то есть по 400 значений ординат Y_k и углов α . Измерения выполняли с помощью нестандартных приборов (рис. 2), позволяющих достаточно точно выдерживать шаг дискретизации.



Р и с. 2. Измерение: а) – ординат комлевой части ленты относительно базовой линии; б) – ординат углов перекоса стеблей в ленте

F i g. 2. Measurement: а) – ordinate of the butt part of the strip relative to the baseline; б) – ordinate of the angles of the distortions of the stems in the strip

При этом полученный ряд значений ординат Y_k подвергали корреляционно-спектральному анализу с предварительной фильтрацией исходного массива чисел от нехарактерных сигналов⁹.

Для анализа угловой дезориентации стеблей в ленте вычисляли основные числовые характеристики процесса $\alpha(L)$ и вероятность $P_{\geq \alpha_d}$ нарушения агротехнических требований к указанному параметру по выражению:

⁹ Кулаичев А. П. Методы и средства комплексного статистического анализа данных : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2022. 484 с.

$$P_{\geq \alpha_d} = 1 - \left[\Phi^* \left(\frac{\alpha_d - m_\alpha}{\sigma_\alpha} \right) - \Phi^* \left(-\frac{\alpha_d - m_\alpha}{\sigma_\alpha} \right) \right], \quad (1)$$

где Φ^* – стандартная функция распределения Лапласа; α_d – допустимое значение угла перегиба стеблей во вспушенной ленте, градус; m_α и σ_α – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение процесса $\alpha(L)$.

Практические расчеты по формуле (1) выполняли с учетом суммы допустимых значений перегибов стеблей, отраженных в агротехнических требованиях к работе льноуборочных комбайнов $\alpha_k \leq 20^\circ$ и вспушивателей $\alpha_b \leq 8^\circ$, то есть $\alpha_d \leq 28^\circ$.

Для оценки влияния различных способов вспушивания на изменение растянутости стеблей в ленте отбирали по десять горстей массы стеблей с каждой реализации до прохода агрегата и после вспушивания. Далее, замеряли длину каждой горсти, среднюю длину стеблей в горсти и вычисляли увеличение относительной растянутости $\Delta\lambda$ в % по формуле:

$$\Delta\lambda = \left(\frac{h_b - h_n}{\bar{l}_c} \right) \cdot 100, \quad (2)$$

где h_b – горстевая длина стеблей во вспушенной ленте, см; h_n – горстевая длина стеблей в исходной ленте, см; $\bar{l}_c$ – средняя длина стеблей в горсти, см.

Разрывы в лентах L_0 вычисляли в процентах от общей длины реализации.

Для проведения технологической оценки тресты во время замеров структурных параметров ленты на ней отмечались участки конкретной длины. Затем для сохранения целостности и структурных параметров ленты льнотресты отмеченные участки (пробы) прошивались нитями (ручной мини швейной машинкой Handy Stitch), помечались этикетками и отправлялись в лабораторию технологического анализа Федерального научного центра лубяных культур на переработку.

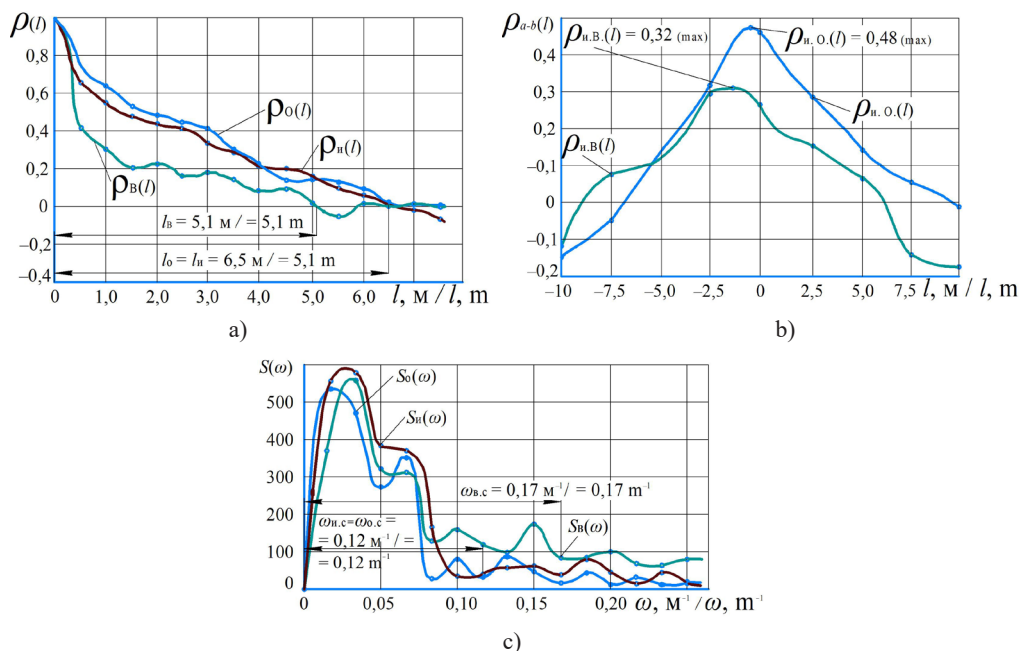
Результаты исследования

В результате обработки первичной информации о процессах $Y_k(L)$ изменения кривизны лент стеблей льна получили нормированные корреляционные функции $\rho(l)$, взаимные корреляционные функции $\rho_{a-b}(l)$ и спектральные плотности $S(\omega)$ изучаемых объектов (рис. 3).

На рисунке 3 (а) показаны нормированные корреляционные функции процессов изменения кривизны лент стеблей льна. Из характера протекания кривых видно, что наиболее близки друг к другу корреляционные функции, полученные по реализациям исходной ленты $\rho_n(l)$ и ленты, обработанной опытным вспушивателем, $-\rho_o(l)$. Сокращение интервала корреляционной связи до $l_n = 5,1$ м между ординатами комлевой части в ленте, вспушенной серийной машиной ВЛ-3, свидетельствует об увеличении беспорядочности пульсаций указанного процесса.

При рассмотрении графиков взаимных корреляционных функций установлена более тесная связь между исходным процессом и процессом, полученным после вспушивания ленты стеблей опытной машиной, с максимальным коэффициентом взаимной корреляции $\rho_{н.о} = 0,48(\max)$ (рис. 3, б). Обработка исходной ленты серийной ворошилкой ВЛ-3 вносит более заметные изменения в параметры ее кривизны со снижением взаимной корреляции до $\rho_{н.б.} = 0,32(\max)$.

Анализ исследуемых процессов в частотной области показывает, что изменения кривизны ленты во всех вариантах являются низкочастотными и узкополосными случайными процессами, у которых основные доли спектральных плотностей $S(\omega)$ сосредоточены в относительно узком диапазоне частот от 0 до $0,12 \text{ м}^{-1}$ (рис. 3, б). При этом следует отметить, что работа ворошилки ВЛ-3 расширяет спектр дисперсий до частот $\omega_c = 0,17 \text{ м}^{-1}$. Кроме того, визуальный анализ спектральных плотностей за пределами значений срезовых частот $\omega > \omega_c$ показывает, что серийный вспушиватель заметно (в 2–3 раза) увеличивает амплитуды высокочастотных колебаний кривизны ленты льна по сравнению с колебаниями кривизны исходной ленты в том же частотном диапазоне. При этом следует положительно отметить, что воздействие опытной машины на ленту льна не произвело существенных изменений в частотной области изучаемого объекта.



Р и с. 3. Результаты корреляционно-спектрального анализа:
а – нормированные корреляционные функции; б – взаимные корреляционные функции;
с – спектральные плотности

Fig. 3. Results of correlation and spectral analysis: a – normalized correlation functions;
b – mutual correlation functions; c – spectral densities

На основании результатов корреляционно-спектрального анализа видно, что внутренняя структура исследуемого процесса максимально сохраняется при работе опытного вспушивателя, тогда как серийная машина ВЛ-3 оказывает существенное влияние на беспорядочность пульсаций с двух- и трехкратным увеличением амплитуд колебаний.

Аналогичная картина выявлена также и при анализе результатов исследования влияния воздействий серийной и опытной машин на изменение перекосов стеблей в ленте (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Table 1

Статистические характеристики процессов перекоса стеблей $\alpha(L)$, градус
Statistical characteristics of stem skewing processes $\alpha(L)$, degree

Вариант / Option	min	max	m_α	σ_α	$P_{\geq \alpha_{\text{доп.}}}, \%$
Исходный / Source	0	25,2	10,13	5,72	0,18
I	0	39,0	16,12	9,41	20,76
II	0	28,3	11,17	5,77	0,36

Несмотря на то, что во всех вариантах математические ожидания процессов $\alpha(L)$ находятся в допустимых пределах $m_\alpha \leq 28^\circ$, воздействия рабочих органов ворошилки ВЛ-3 (вариант I) наиболее заметно увеличивают перекосы стеблей (в среднем на 6°) по отношению к значению аналогичного параметра в исходной ленте. При этом следует отметить, что с учетом диапазона рассеивания значений $\pm 3\sigma_\alpha$ максимальная вероятность нарушения агротехнических требований также наблюдается при работе серийной машины. Вместе с тем опытный вспушиватель допускает наименьшие изменения анализируемых показателей (вариант II).

Одним из важных структурных параметров, влияющих на пригодность слоя к трепанию, является растянутость стеблей относительно друг друга. Указанный параметр также получил существенные изменения под влиянием пальцев подбигающих барабанов ворошилки ВЛ-3 (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Table 2

Относительная растянутость стеблей и разрывы в лентах
Relative elongation of stems and breaks in ribbons

Вариант / Option	Растянутость стеблей в ленте, раз / The elongation of the stems in the ribbon, times			Разрывы в лентах, % / Gaps in the tapes, %		
	$\lambda_{\text{исх.}}$	$\lambda_{\text{всп.}}$	$\Delta\lambda, \%_{\text{абс.}}$	$L_{0\text{исх.}}$	$L_{0\text{всп.}}$	ΔL_0
I	1,407	1,476	6,9	0,56	5,55	4,99
II	1,381	1,389	0,8	0	0,83	0,83

При этом относительная растянутость стеблей во вспушенной ленте увеличилась на 6,9 %. Кроме того, серийная машина образовала разрывы в лентах со сгруживанием массы стеблей, что затруднит просушивание слоя в местах его уплотнения. При работе опытного вспушивателя указанные параметры также получили изменения, но менее заметные и несущественные.

Технологическая оценка льнотресты проводилась в Федеральном научном центре лубяных культур с целью изучения влияния разных технических средств и структурных параметров ленты стеблей на выход и качество длинного волокна. Исследования проводились с использованием льнокомбайна ЛК-4А (расстил ленты), ворошилки (вспушивателя) ленты ВЛ-3 и опытного вспушивателя ленты. Определялось влияние на эти показатели основных структурных параметров ленты: перекоса, растянутости и перекрещивания стеблей в ней. Результаты эксперимента, статистически доказуемые, показаны в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Показатели технологической оценки льнотресты в лабораторно-полевом опыте
Indicators of technological evaluation of flax straw in laboratory and field experience

Вариант / Option	Структурный параметр ленты стеблей / Structural parameter of the ribbon of stems	Показатели структурных параметров ленты / Indicators of the structural parameters of the tape	Длинное волокно / Long fiber		
			Выход, % / Exit, %	Средний интерполированный номер / Average interpolated number	Процентномер / Percentage number
I (ВЛ-3) / I (VL-3)	Перекос стеблей в ленте, град. / Skewed stems in the ribbon, hail	37,3	12,25	9,6	117,6
	Растянutosть стеблей в ленте, раз. / Elongation of the stems in the ribbon, times	1,45	11,65	9,5	110,68
	Перекрещивание стеблей в ленте (сетка), град. / Crossing of stems in a ribbon (grid), hail	+36; -35,3	11,30	9,4	106,22
II (ОВ) / II (OV)	Перекос стеблей в ленте, град. / Skewed stems in the ribbon, hail	27,9	13,05	10,2	133,11
	Растянutosть стеблей в ленте, раз. / Elongation of the stems in the ribbon, times	1,35	12,4	10,0	124,0
	Перекрещивание стеблей в ленте (сетка), град. / Crossing of stems in a ribbon (grid), hail	+28; -25,4	11,69	9,8	114,56
III (ЛК-4А) / III (LC-4A)	Перекос стеблей в ленте, град. / Skewed stems in the ribbon, hail	20,2	13,5	11,0	148,5
	Растянutosть стеблей в ленте, раз. / Elongation of the stems in the ribbon, times	1,3	13,0	10,8	140,4
	Перекрещивание стеблей в ленте (сетка), град. / Crossing of stems in a ribbon (grid), hail	+21,2; -19,8	12,9	10,4	134,16

Из таблицы 3 следует, что в сравнении с лентами, разостланными льнокомбайном ЛК-4А, наибольшее негативное влияние на показатели выхода и качества длинного волокна оказывает ворошилка (вспушиватель) лент ВЛ-3 (среднее в сравнении с контролем снижение выхода длинного волокна по трем указанным структурным параметрам ленты на 11,19 %, а номера на 1,13 единицы). Наименьшее такое влияние на эти показатели оказывает опытный вспушиватель лент (среднее в сравнении с контролем снижение выхода длинного волокна составило 6,1 %, их номера – на 0,73 единицы).

В результате оценки тресты установлено влияние структурных параметров ленты на показатели выхода и качества длинного волокна (табл. 3). Во всех трех вариантах опыта наибольшее негативное влияние на указанные показатели оказывает перекрещивание стеблей в ленте, а наименьшее – перекос ленты стеблей. Растянutosть стеблей в ленте занимает промежуточное положение между этими вариантами.

Обсуждение и заключение

Проведенные исследования показали, что ухудшение структурных параметров слоя стеблей делает его малопригодным для эффективного выделения длинного волокна на льнозаводе. В большинстве случаев указанный недостаток является следствием принципа работы современных машин для вспушивания лент льна. При этом серийные ворошилки и вспушиватели производят технологический процесс, при котором лента стеблей перемещается под подбирающим барабаном, вызывая тем самым хаотичные перекосы и перекрещивания стеблей, а также увеличение растянутости стеблей в ленте.

Исследования показывают, что дополнительные механические воздействия на ленту стеблей, возникающие при работе вспушивателя с перемещением ленты стеблей под подбирающим барабаном, могут быть существенно снижены за счет улучшения конструкции рабочих органов (формы зуба, копирующего устройства и др.) вспушивателя лент. Разработанный опытный образец вспушивателя, перемещающий ленту стеблей над подбирающим барабаном с показателем кинематического режима, равным единице, в котором каждый палец подбирающего барабана копирует поверхность поля независимо от других, позволяет максимально сохранить исходные структурные параметры ленты и устранить дополнительное механическое воздействие на стебли.

Результаты сравнительных исследований процессов вспушивания лент стеблей льна серийной и опытной машинами показали, что во всех вариантах низкочастотный диапазон изгибов исходной и вспушенных лент остался неизменным. Однако за пределами срезовых частот $\omega > 0,12...0,17 \text{ м}^{-1}$ амплитуды колебаний кривизны ленты льна получили существенные изменения (в 2–3 раза) в результате воздействий рабочих органов серийной ворошилки ВЛ-3. Хаотичность указанных пульсаций возросла в связи с увеличением перекосов и растянутости стеблей в ленте на 6,0° и 6,9 % соответственно. Вместе с тем опытный образец опытного вспушивателя произвел наименьшие изменения структурных параметров слоя стеблей, влияющих на выход и качество длинного волокна.

Таким образом, экспериментально установлено, что перемещение ленты стеблей льнотресты под подбирающим барабаном уменьшает выход и качество длинного волокна по сравнению с его выходом и номером при транспортировке ленты над подбирающим барабаном, что необходимо учитывать при разработке новых технических средств аналогичного значения.

Применение опытного впусшителя обеспечило среднюю выработку длинного волокна 12,38 %, а его номер составил 10 единиц, что в сравнении с ворошилкой ВЛ-3 выше на 0,65 % и на 0,5 единицы соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные проблемы научного обеспечения льноводства / Р. А. Ростовцев [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 3. С. 45–52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
2. Перов М. Г. Анализ состояния и пути повышения качества льнотресты // Наука в центральной России. 2022. Т. 58, № 4. С. 53–61. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
3. Способ впусшания лент льна : патент 2559004 Российская Федерация / Романов В. А. [и др.]. № 2014125649/13 ; заявл. 24.06.2014 ; опубл. 10.08.2015. 5 с.
4. Akin D. E. Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax // International Scholarly Research Notices. 2013. Vol. 2013. Article no. 186534. <https://doi.org/10.5402/2013/186534>
5. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting / J. Mańkowski [et al.] // Journal of Natural Fibers. 2017. Vol. 15, Issue 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
6. Смирнов Н. А., Смирнов С. В. Пути повышения уровня механизации при уборке льнотресты // Машинно-технологическая модернизация льняного агропромышленного комплекса на инновационной основе : Сборник научных трудов ВНИИМЛ. Тверь : Твер. гос. ун-т, 2014. С. 80–85. URL: https://www.cnsnb.ru/Vexhib/volk/14_12729.pdf (дата обращения: 17.05.2023).
7. Зинцов А. Н., Билан М. М. О необходимости совершенствования процесса впусшания лент тресты льняной // Аграрный вестник Нечерноземья. 2022. № 2. С. 38–44. https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_02_38
8. Ковалев М. М., Перов Г. А., Перов М. Г. Интенсификация процесса впусшания лент льна // Техника и оборудование для села. 2015. № 12. С. 24–29. URL: <https://clck.ru/36jDDZ> (дата обращения: 17.05.2023).
9. Ковалев М. М., Перов Г. А., Зубанов В. В. Экспериментальные исследования инновационного впусшателя льнотресты // Техника и оборудование для села. 2016. № 8. С. 32–36. URL: <https://clck.ru/36jDRW> (дата обращения: 17.05.2023).
10. Впусшитель лент льна : патент 2527510 Российская Федерация / Перов Г. А., Ковалев М. М., Зубанов В. В. № 2013134062 ; заявл. 19.07.2013 ; опубл. 10.09.2014. 6 с.
11. Зинцов, А. Н., Ковалев М. М., Перов Г. А. Вероятностная модель кинематики устройства для уменьшения растянутости стеблей льна-долгунца в ленте // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 1. С. 126–144. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.126-144>
12. Смирнов Н. А., Смирнов С. С. Проверка новой технологии уборки и подготовки к переработке тресты в производственных условиях // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. 2008. № 68. С. 90–98. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004334581?ysclid=lpkwokjeqh72380934> (дата обращения: 07.06.2023).
13. Новая технология уборки льна, уборки и подготовки к переработке тресты / Н. А. Смирнов [и др.]. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. Т. 1, № 43. С. 169–173. URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/71> (дата обращения: 07.06.2023).
14. Подбирающий аппарат для стеблей сельскохозяйственных культур : патент 2658387 Российская Федерация / Смирнов Н. А., Соколов В. Н., Смирнов С. В. № 2017104767 ; заявл. 14.02.2017 ; опубл. 21.06.2018. 6 с.
15. Впусшитель лент льна : патент 2694887 Российская Федерация / Смирнов Н. А. [и др.]. № 2016150744 ; заявл. 22.12.2016 ; опубл. 18.07.2019. 6 с.

16. Вспушиватель лент льна : патент 2547391 Российская Федерация / Перов Г. А., Ковалев М. М., Зубанов В. В. № 2013151517 ; заявл. 19.11.2013 ; опубли. 10.04.2015. 6 с.
17. Петраченко Д. А., Коропченко С. П. Влияние подготовительных операций в процессе формирования слоя на выход длинного волокна // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. № 5–6. С. 56–58. URL: <https://clck.ru/36jqnP> (дата обращения: 23.04.2023).
18. Investigation of the Process of Plant Swath Alignment in the Second Stage of the Fiber Flax Swath Harvesting / Yu. F. Lachuga [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2023. Vol. 49, Issue 1. P. 89–95. <https://doi.org/10.3103/S106836742301010X>
19. Зинцов А. Н., Соколов В. Н. Новый процесс вспушивания лент льнотресты // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 91–100. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-91-100>
20. Цветков А. О., Смирнов Н. А. Анализ работы вспушивателей лент тресты льняной // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 85. С. 132–136. URL: <https://reader.lanbook.com/journalArticle/395702> (дата обращения: 07.06.2023).
21. Ковалев М. М. Обоснование параметров и режимов работы подбирающего аппарата безударного воздействия на ленту льна // Сільськогосподарські машини : Зб. наук. ст. Вип. 18. Луцьк : Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2009. С. 157–166. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/77/%D0%92%D0%98%D0%9F%D0%A3%D0%A1%D0%9A%2018> (дата обращения: 07.06.2023).
22. Research of the Flax Stems Line Arranging Mechanism / O. O. Nalobina [et al.] // INMATEH – Agricultural Engineering. 2017. Vol. 53, Issue 3. P. 51–56. EDN: YBHKLZ
23. Heller K. Technologie Uprawy i Przerobu Lnu i Konopi w Warunkach Zrównoważonego i Wielofunkcyjnego Rozwoju Rolnictwa Polskiego. Fragmenta Agronomica. 2007. Vol. 24, Issue 3. P. 181–186. URL: <http://www.pta.up.poznan.pl/fragmenta-agronomica-vol-24-no-3-2007.html> (дата обращения: 06.07.2023).

*Поступила в редакцию 09.06.2023; поступила после рецензирования 09.08.2023;
принята к публикации 20.08.2023*

Об авторах:

Зинцов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры тракторов и автомобилей Костромской государственной сельскохозяйственной академии (156530, Российская Федерация, Костромская область, пос. Караваево, ул. Учебный городок, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>, Researcher ID: ADY-1834-2022, zintsov_a@mail.ru

Ковалев Михаил Михайлович, доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (17041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>, Researcher ID: AAT-4775-2021, m.kovalev@fncl.ru

Перов Геннадий Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (17041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>, Researcher ID: AAB-5326-2022, g.perov@fncl.ru

Перов Михаил Геннадьевич, научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (17041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>, Researcher ID: IST-2204-2023, mexanikuspost@yandex.ru

Добрецов Вячеслав Александрович, студент 2 курса магистратуры Костромской государственной сельскохозяйственной академии (156530, Российская Федерация, Костромская область, пос. Караваево, ул. Учебный городок, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6255-4824>, dobrvsoigrad@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. Н. Зинцов – постановка задачи, подготовка начального текста с последующей доработкой, проведение исследований, анализ результатов, визуализация.

М. М. Ковалев – формулирование концепции решения, научное руководство, критический анализ результатов исследования, разработка и доработка решения.

Г. А. Перов – определение методологии исследования, сбор и анализ материалов по теме исследования, доработка текста.

М. Г. Перов – литературный и патентный анализ, проведение исследований и обработка экспериментальных данных.

В. А. Добрецов – подготовка и проведение исследований, обработка экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The Main Problems of Scientific Support of Flax Growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):45–52. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
2. Perov M.G. Analysis of the State and Ways to Improve the Quality of Flax. *Science in Central Russia*. 2022;58(4):53–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
3. Romanov V.A., Kovalov M.M., Lachuga Yu.F., Perov G.A. [Method of Fluffing Flax Ribbons]. Patent 2,559,004 Russian Federation. 2015 August 10. 5 p. (In Russ.)
4. Akin D.E. Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax. *International Scholarly Research Notices*. 2013;186534. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.5402/2013/186534>
5. Mankowski J., Maksymiuk W., Spychalski G., Kołodziej J., Kubacki A., Kupka D. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2017;15(1):53–56. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
6. Smirnov N.A., Smirnov S.V. Ways to Increase the Level of Mechanization During Flax Harvesting. Machine-Technological Modernization of Flax Agro-Industrial Complex on an Innovative Basis. *Collection of Scientific Papers of VNIIML. Tver State University*. 2014;80–85. Available at: https://www.cnsbh.ru/Vexhib/volk/14_12729.pdf (accessed 17.05.2023). (In Russ.)
7. Zintsov A.N., Bilan M.M. On the Need to Improve the Process of Fluffing Tapes of Linen Trusts. *Agrarian Bulletin of Nechernozemye*. 2022;(2):38–44. (In Russ.) https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_02_38
8. Kovalev M.M., Perov G.A., Perov M.G. Intensification of the Process of Fluffing Flax Ribbons. *Machinery and Equipment for Countryside*. 2015;(12):24–29. Available at: <https://clck.ru/36jDDZ> (accessed 17.05.2023). (In Russ.)
9. Kovalev M.M., Perov G.A., Zubanov V.V. Experimental Studies of the Innovative Flaxseed Fluffer. *Machinery and Equipment for Countryside*. 2016;(8):32–36. Available at: <https://clck.ru/36jDRW> (accessed 17.05.2023). (In Russ.)
10. Perov G.A., Kovalev M.M., Zubanov V.V. [Flax Ribbon Fluffer]. Patent 2,527,510 Russian Federation. 2014 September 10. 6 p. (In Russ.)
11. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Probabilistic Model of the Kinematics of the Device for Reducing Elongation of Flax Fiber Stems in the Tape. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):126–144. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.126-144>
12. Smirnov N.A., Smirnov S.S. Verification of a New Technology of Harvesting and Preparation for Processing Trusts in Production Conditions. *Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy*. 2008;(68):90–98 Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004334581?ysclid=lpkwokjeqh72380934> (accessed 07.06.2023). (In Russ.)
13. Smirnov N.A. New Technologies of Flax Harvesting, Harvesting and Preparation for Processing Trusts. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2009;43(1):169–173. Available at: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/71> (accessed 07.06.2023). (In Russ.)
14. Smirnov N.A., Sokolov V.N., Smirnov S.V. [Picking Apparatus for Stems of Agricultural Crops]. Patent 2,658,387 Russian Federation. 2018 June 21. (In Russ.)
15. Smirnov N.A., Sokolov V.N., Yablokov A.A., Smirnov S.V. [Flax Ribbon Fluffer]. Patent 2,694,887 Russian Federation. 2019 July 18. (In Russ.)



16. Perov G.A., Kovalev M.M., Zubanov V.V. [Flax Ribbon Fluffer]. Patent 2,547,391 Russian Federation. 2015 April 10. (In Russ.)
17. Petrochenko D.A., Koropchenko S.P. The Influence of Preparatory Operations in the Process of Layer Formation on the Yield of a Long Fiber. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014;(5–6):56–58. Available at: <https://clck.ru/36jqnP> (accessed 04.23.2023). (In Russ.)
18. Lachuga Y.F., Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Investigation of the Process of Plant Swath Alignment in the Second Stage of the Fiber Flax Swath Harvesting. *Russian Agricultural Sciences*. 2023;49(1):89–95. <https://doi.org/10.3103/S106836742301010X>
19. Zintsov A.N., Sokolov V.N. A New Process of Plowing Flax Belts. *Tractors and Agricultural Machines*. 2020;87(6):91–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-91-100>
20. Tsvetkov A.O., Smirnov N.A. An Analysis of the Work of the Ribbon Fluffers Linen Trusts. *Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy*. 2016;(85):132–136. Available at: <https://reader.lanbook.com/journalArticle/395702> (accessed 06.07.2023). (In Russ.)
21. Kovalev M.M. Substantiation of Parameters and Modes of Operation of the Pick-up Apparatus of Impact-Free Impact on the Flax Ribbon. *Silskohospodarski mashyny*. 2009;18:157–166. Available at: <https://forum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/77%D0%92%D0%98%D0%9F%D0%A3%D0%A1%D0%9A%2018> (accessed 07.06.2023). (In Russ.)
22. Nalobina O.O., Gerasymchuk O.P., Puts V.S., Marchuk M.M. Research of the Flax Stems Line Arranging Mechanism. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017;53(3):51–56. EDN: YBHKLZ
23. Heller K. Technologie Uprawy i Przerobu Lnu i Konopi w Warunkach Zrównoważonego i Wielofunkcyjnego Rozwoju Rolnictwa Polskiego. *Fragmenta Agronomica*. 2007;24(3):181–186. (In Pol.). Available at: <http://www.pta.up.poznan.pl/fragmenta-agronomica-vol-24-no-3-2007.html> (accessed 07.06.2023).

Submitted 09.06.2023; revised 09.08.2023; accepted 20.08.2023

About the authors:

Alexander N. Zintsov, Professor of the Chair of Tractors and Automobiles of Kostroma State Agricultural Academy (34 Uchebny Gorodok St., Karavaevo, Kostroma Oblast 156530, Russian Federation), D.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>, Researcher ID: ADY-1834-2022, zintsov_a@mail.ru

Mikhail M. Kovalev, Chief Researcher, D.Sci. (Engr.), Federal Research Center of Bast Crops (17/5 Komsomolskiy Prospekt, Tver 617041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>, Researcher ID: AAT-4775-2021, m.kovalev@fncl.ru

Gennady A. Perov, Leading Researcher, Cand.Sci. (Engr.), Federal Research Center of Bast Crops (17/5 Komsomolskiy Prospekt, Tver 617041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>, Researcher ID: AAB-5326-2022, g.perov@fncl.ru

Mikhail G. Perov, Researcher, Federal Research Center for Bast Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver, 17041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>, Researcher ID: IST-2204-2023, mexanikuspost@yandex.ru

Vyacheslav A. Dobretsov, Master's Student of Kostroma State Agricultural Academy (34 Uchebny Gorodok St., Karavaevo, Kostroma Oblast 156530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6255-4824>, dobrvsoligrad@mail.ru

Authors contribution:

A. N. Zintsov – formulation of the problem, preparation of the initial text with subsequent revision, pursuance of the research, analysis of results, visualization.

M. M. Kovalev – formulation of the research concept, scientific guidance, critical analysis of the research results, development and refinement of the solution.

G. A. Perov – definition of the research methodology, collection and analysis of materials on the research topic, revision of the text.

M. G. Perov – literary and patent analysis, research and processing the experimental data.

V. A. Dobretsov – preparation and pursuance of the research, processing the experimental data.

All authors have read and approved the final manuscript.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ / FOOD SYSTEMS

УДК 637.5:637.513.48

doi: 10.15507/2658-4123.033.202304.558-584

Оригинальная статья



Применение нечеткой и четкой математических моделей в гибридном управлении процессом одностадийного измельчения замороженного мясного сыра

Б. Р. Каповский ✉, **В. А. Пчелкина**, **А. С. Дыдыкин**
*Федеральный научный центр пищевых систем
им. В. М. Горбатова (г. Москва, Российская Федерация)*
✉ b.kapovski@fneps.ru

Аннотация

Введение. При одностадийном измельчении замороженного мясного сыра методом фрезерования возникает изменение температуры пограничного слоя, что приводит к пластичным деформациям сыра и увеличению размеров мясной стружки. Задача регулирования режимных параметров процесса резания сыра в зависимости от его температуры может быть решена путем компьютерного расчета прогноза температуры пограничного слоя мяса на несколько временных интервалов с использованием нечеткой логики.

Цель статьи. Разработка алгоритма гибридного управления одностадийным измельчением замороженного мясного сыра с использованием нечеткой и четкой математических моделей управления.

Материалы и методы. Объектом исследования является процесс измельчения замороженного блочного мяса (говядины) на лабораторной установке одностадийного измельчителя производительностью 400 кг/час. Для разработки нечеткой математической модели управления использовали алгоритм Э. Мамдани. Математическое моделирование осуществляли в среде MATLAB (пакет Fuzzy Logic Toolbox).

Результаты исследования. Разработана модель нечеткого управления работы интеллектуальной системы управления (ИСУ) при формировании задания на установление режимных параметров процесса измельчения сыра с применением адаптивного прогнозирования его температуры. Для этой модели сформировали функции принадлежности входной и выходной переменных, а также базу правил. Предложена функциональная схема температурного контроля, которая отражает структуру нечеткой модели управления одностадийным измельчением. К преимуществам такого контроля можно отнести то, что системе придется функция непрерывного автоматизированного контроля температурного режима измельчения сыра под управлением промышленного компьютера.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты температурного контроля можно использовать для дальнейшей технологической обработки мяса. Используя информацию о температуре сыра, его химическом составе, система может реализовать оптимальное смешивание ингредиентов мясного фарша. Все указанные

© Каповский Б. Р., Пчелкина В. А., Дыдыкин А. С., 2023



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

характеристики сырья искусственный интеллект рассчитывает без участия человека-оператора, что позволяет полностью автоматизировать технологическую обработку мяса с целью производства готовой продукции высокого качества.

Ключевые слова: фрезерование, режим измельчения, замороженное мясо, нечеткая логика, гибридная модель управления

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Каповский Б. Р., Пчелкина В. А., Дыдыкин А. С. Применение нечеткой и четкой математических моделей в гибридном управлении процессом одностадийного измельчения замороженного мясного сырья // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 558–584. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.558-584>

Original article

Application of Fuzzy and Clear Mathematical Models in Hybrid Control of the Process of Single-Stage Mincing of Frozen Meat

B. R. Kapovskiy , **V. A. Pchelkina**, **A. S. Dydykin**
V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems
(Moscow, Russian Federation)

 b.kapovski@fneps.ru

Abstract

Introduction. During one-stage mincing of frozen meat by milling, a change in the temperature of the boundary layer occurs resulting in plastic deformations of the raw meat and an increase in the size of the meat chips. The problem of regulating the operating parameters for the raw meat mincing process depending on its temperature can be solved through computer calculations of the temperature forecast of the meat boundary layer for several time intervals using fuzzy logic. The aim of the study was to develop an algorithm for hybrid control of single-stage mincing of frozen meat using fuzzy and clear mathematical control models.

Aim of the Article. The article is aimed at developing a hybrid control algorithm for single-stage grinding of frozen meat using fuzzy and clear mathematical control models.

Materials and Methods. The object of the study was the process of mincing frozen meat block (beef) with the use of a laboratory installation for a single-stage mincing with a capacity of 400 kg/hour. The E. Mamdani algorithm was used to develop a fuzzy mathematical control model. Mathematical modeling was carried out in the MATLAB, the Fuzzy Logic Toolbox package.

Results. There was developed a model for fuzzy control of the operation of an intelligent control system (ICS) when forming a task for setting the operating parameters of the meat mincing process with the use of adaptive forecasting of meat temperature. For this model, the membership functions of the input and output variables and a rule base (knowledge base) were created. There was proposed a functional scheme of temperature control, which reflects the structure of a fuzzy control model for single-stage mincing. The advantages of this control include the fact that the system is given the function of continuous automated control of the temperature regime of mincing raw meat under the control of an industrial computer.

Discussion and Conclusion. The results of temperature control can be used for further technological processing of meat. Using information about the temperature and chemical composition of raw meat, the ICS can realize the optimal mixing of minced meat ingredients. Artificial intelligence calculates all these characteristics of meat without the participation of a human operator. It makes it possible to fully automate the technological processing of meat in order to produce finished products of guaranteed high quality.

Keywords: milling, mincing mode, frozen meat, fuzzy logic, hybrid control model

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

For Citation: Kapovskiy B.R., Pchelkina V.A., Dydykin A.S. Application of Fuzzy and Clear Mathematical Models in Hybrid Control of the Process of Single-Stage Mincing of Frozen Meat. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):558–584. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.558-584>

Введение

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации¹ переход к передовым интеллектуальным производственным технологиям, а также создание безопасных и качественных продуктов питания относятся к приоритетам научно-технического развития страны. Интеллектуальная система управления (далее – ИСУ) процессом одностадийного измельчения замороженного мясного сырья на основе прогностической адаптивной модели рассчитывает прогноз температуры пограничного слоя мяса в зоне контакта сырья с режущим инструментом измельчителя. По результатам расчета ИСУ устанавливает режимные параметры процесса измельчения: скорость резания мяса и скорость подачи сырья в зону измельчения с целью стабилизации размера получаемой мясной стружки. На основе математической модели процесса измельчения методом фрезерования (одностадийного измельчения) ИСУ рассчитывает математическое ожидание и дисперсию размера мясной стружки как случайной величины. Основываясь на данных, полученных от измерительных датчиков, комплектующих систему, а также на данных аналитического расчета, ИСУ может вычислить границы «коридора» и степень «размытости» границ, в которых будет находиться размер мясной стружки. Отметим, что ИСУ накапливает статистическую информацию о процессе измельчения, обучаясь в процессе работы. Это является характерной чертой современных интеллектуальных систем управления² [1; 2].

Для полной автоматизации технологической обработки измельченного мяса и производства высококачественной готовой продукции актуальной задачей является стабилизирование средствами ИСУ режимных параметров процесса резания замороженного сырья, установленных с использованием нечеткой модели управления. Для решения указанной задачи целесообразно использовать математическую модель одностадийного измельчения сырья по методу фрезерования, применяемую в области четкой (булевой) логики [3].

Целью данного исследования являлась разработка алгоритма гибридного управления одностадийным измельчением замороженного мясного сырья с использованием нечеткой и четкой математических моделей управления. Задачей исследования являлась разработка адаптивной прогностической модели определения температуры пограничного слоя блочного мяса в процессе его переработки и математической модели на основе теории нечетких множеств для расчета режимных параметров измельчения сырья с использованием данных прогноза.

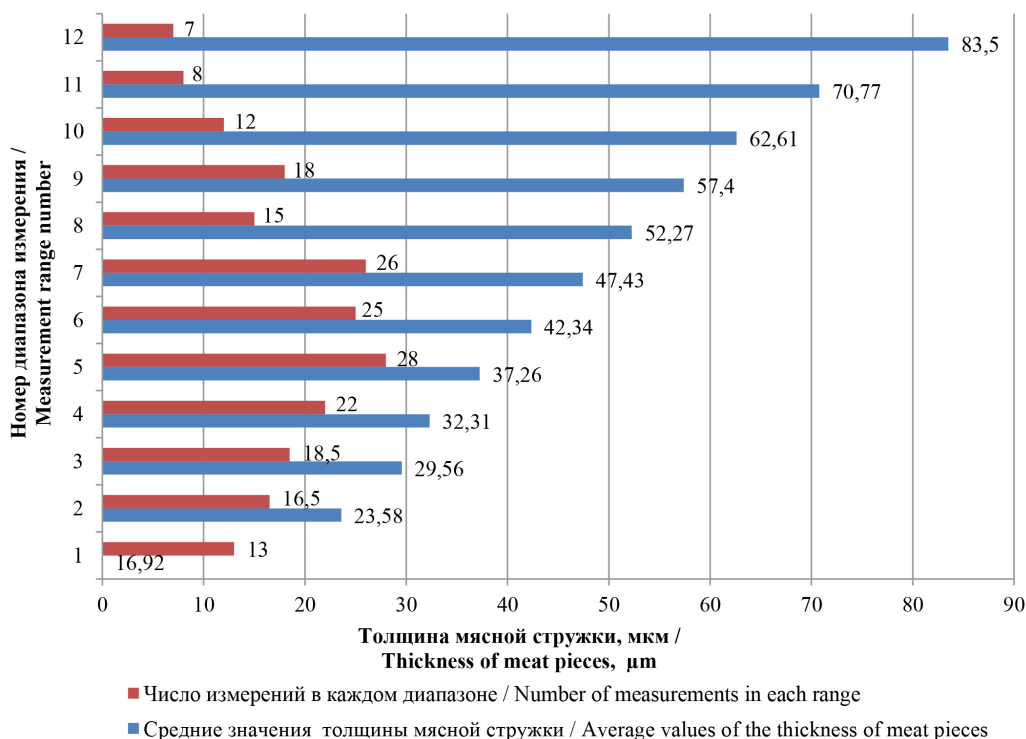
Обзор литературы

Температурный контроль замороженного мяса в процессе его измельчения по методу фрезерования является особо важной задачей. Температура сырья в зоне резания повышается из-за интенсивного теплообмена между тонким пограничным

¹ О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : Указ Президента РФ от 01.12.2016. № 642.

² Интеллектуальное управление динамическими системами // С. Н. Васильев [и др.]. М. : Физико-математическая литература, 2000. 352 с.

слоем мяса, срезаемым рабочим инструментом измельчителя, и самим этим инструментом, разогретым в процессе работы. Исследование микроструктуры тонко измельченного сырья показало, что толщина получаемой мясной стружки в зоне контакта с режущим инструментом составляет доли миллиметра [4]. Гистограмма распределения толщины мясной стружки при комплектации одностадийного измельчителя фрезой цилиндрической насадной по ГОСТ 29092-91 представлена на рисунке 1. Режимные параметры процесса измельчения составили: скорость подачи сырья на фрезу – 0,0243 м/с; частота вращения фрезы – 2289,14 мин⁻¹.

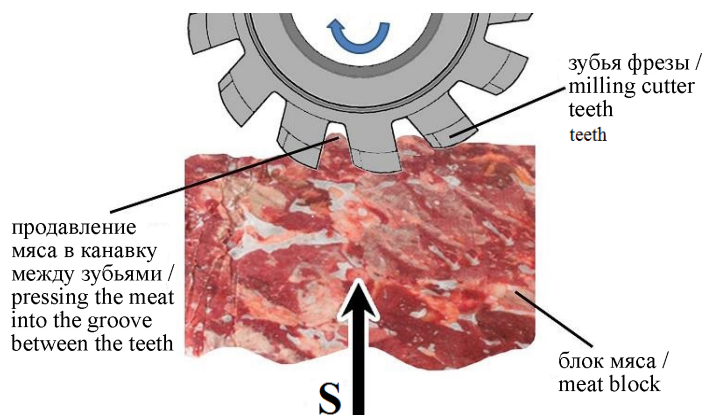


Р и с. 1. Гистограмма распределения размера (толщины) мясной стружки при одностадийном измельчении. Диапазоны измерения: 1 – 14–20 μm ; 2 – 20–26 μm ; 3 – 26–30 μm ; 4 – 30–35 μm ; 5 – 35–40 μm ; 6 – 40–45 μm ; 7 – 45–50 μm ; 8 – 50–55 μm ; 9 – 55–60 μm ; 10 – 60–66 μm ; 11 – 66–76 μm ; 12 – 76–91 μm

F i g. 1. Histogram of the distribution of the thickness of meat chips during single-stage mincing. Measuring ranges: 1 – 14–20 μm ; 2 – 20–26 μm ; 3 – 26–30 μm ; 4 – 30–35 μm ; 5 – 35–40 μm ; 6 – 40–45 μm ; 7 – 45–50 μm ; 8 – 50–55 μm ; 9 – 55–60 μm ; 10 – 60–66 μm ; 11 – 66–76 μm ; 12 – 76–91 μm

Нагрев замороженного мяса до температуры, близкой к его криоскопической температуре, обуславливает проявление пластических свойств мяса. На рисунке 2 представлено проявление пластических свойств сырья в процессе его одностадийного измельчения многолезвийным инструментом [5]. Как видно из рисунка 2, в процессе измельчения сырья из-за его пластичности возрастает толщина срезаемой мясной стружки, что приводит к увеличению дисперсии указанного размера получаемой

стружки относительно среднего его значения (математического ожидания) и отрицательно сказывается на гомогенности получаемого измельченного продукта. Для снижения дисперсии размера стружки следует увеличить скорость резания сырья, сведя к минимуму эффект его продавливания в канавку между смежными зубьями фрезы. Поддерживать максимально высокой частоту вращения фрезы в течение всего временного периода измельчения партии блочного мяса, перерабатываемого на технологической линии непрерывного действия, нецелесообразно для снижения энергозатрат на процесс резания сырья.



Р и с. 2. Проявление пластических свойств мяса, S – направление подачи сырья

F i g. 2. Manifestation of meat plastic properties, S – feed direction of the meat

К особенностям фрезерования блочного мяса следует отнести жесткое крепление блока сырья в направляющих плоскостях рабочей камеры измельчителя, что приводит к пластическим деформациям поверхностного слоя мяса. Известно, что пластические деформации материала приводят к его нагреву³. Кроме того, при подаче сырья на режущий вал измельчителя работа сил трения блока мяса о направляющие плоскости переходит в тепловую энергию, нагревающую его поверхностный слой.

К причинам изменения температуры пограничного слоя блочного мяса в процессе его переработки можно отнести: нагрев рабочего инструмента измельчителя при длительной работе технологической линии; возможные перерывы в работе линии и «отепление» сырья, находящегося вне морозильной камеры; использование блоков мяса при различной температуре их хранения перед измельчением и т. п. Отсюда возникает задача регулирования режимных параметров процесса резания сырья в зависимости от его температуры. Следовательно, необходимо осуществить измерение температуры мяса при его измельчении в режиме реального времени работы одностадийного измельчителя. Для решения сформулированной выше задачи регулирования следует знать температуру пограничного слоя мяса непосредственно в зоне резания сырья. Однако, учитывая инерционность электромеханической системы измельчителя, влияющую на время переключения режима резания, определять искомую температуру целесообразно со временем упреждения, основываясь на данных измерения температуры и расчетных данных,

³ Васин С., Верещака А., Кушнер В. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 448 с.

полученных для пограничных слоев мяса, отделенных от массива этого же мясного блока в предыдущие моменты времени послойного измельчения сырья. Другими словами, речь идет о расчете прогноза температуры пограничного слоя мяса на несколько временных интервалов вперед, проведенном компьютером, комплектующим систему управления, в режиме реального времени без участия оператора. Минимальное суммарное значение указанных временных интервалов, глубина прогноза, обуславливается инерционностью системы управления и определяется расчетным путем.

Авторы предлагают использовать математическую модель, разработанную на основе теории нечетких множеств [6], для расчета режимных параметров измельчения сырья с использованием данных прогноза температуры пограничного слоя блочного мяса в процессе его переработки. Указанная модель обуславливает зависимость параметров режима измельчения сырья от его температуры с учетом изменения структурно-механических свойств замороженного мяса, влияющих на его измельчение, в температурных диапазонах, имеющих нечетко определенные границы. Отметим, что нечеткие математические модели могут быть эффективно использованы в управлении биотехнологическими и пищевыми процессами, которые во многих случаях имеют нечеткие границы диапазонов изменения параметров, характеризующих эти процессы [7; 8; 9]. Например, теорию нечетких множеств целесообразно применить для решения задач сенсорной оценки при вычислении данных в неопределенных и неточных условиях, что может привести к «более точной физической интерпретации» [10].

Материалы и методы

Объектом исследования являлся процесс одностадийного измельчения замороженного блочного мяса (говядины второго сорта, далее по тексту – говядина), который осуществляли на лабораторной установке одностадийного измельчения производительностью 400 кг/ч. Длина экспериментальных блоков замороженного мяса, измельченных в лабораторных условиях и нарезанных из блоков промышленного размера, составила 0,3 – 0,4 м.

Полученные ранее экспериментальные данные [4] подтверждают гипотезу о нормальном законе распределения нагрузки на фрезу при измельчении блоков промышленных размеров. Случайный процесс нагрузки на фрезу предполагаем стационарным процессом, обладающим свойством эргодичности⁴. Указанные приближения дают основание использовать экстраполяцию для прогнозирования температуры слоев мяса, отделяемых от массива мясного блока в процессе его измельчения.

Принимается допущение, принятое в практике холодильной технологии, о параболическом распределения температуры по сечению тела простой формы. В рассматриваемом случае – параллелепипеда⁵. Сечение блока мяса приближенно рассматривается как плоскопараллельная фигура без учета кривизны поверхности резания.

Выбор метода прогнозирования средней температуры сечения блока замороженного мяса в процессе его измельчения проводили в соответствии с современными представлениями об адаптивных методах краткосрочного прогнозирования временных рядов [11; 12].

⁴ Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАЛИТ. 2006. 816 с.

⁵ Чижов Г. Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. М. : Пищевая промышленность, 1979. 302 с.

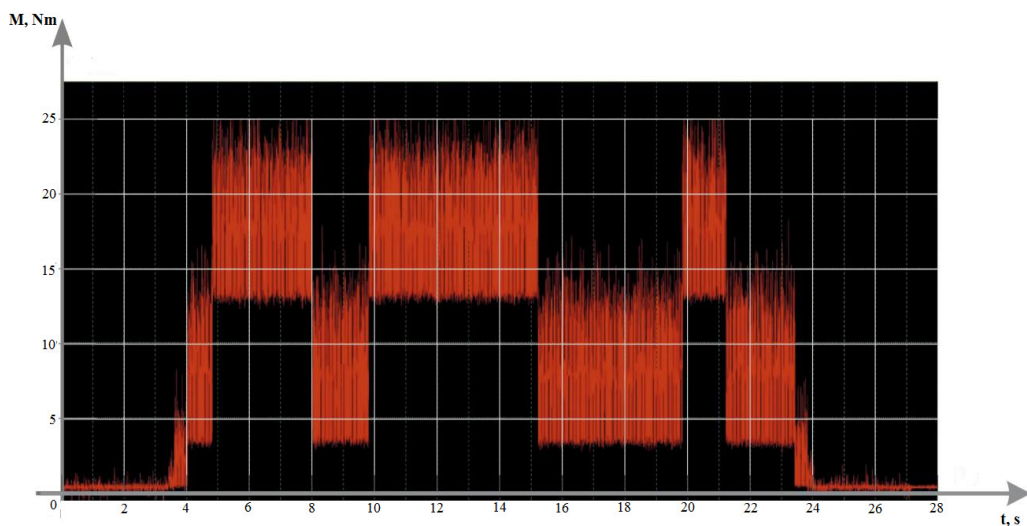
Регистрацию электромагнитного момента приводного электродвигателя механизма резания одностадийного измельчителя в рабочем режиме производили с помощью цифрового многоканального самописца Flash-Recorder-2-16RTC-SD.

Для разработки нечеткой математической модели управления использовали широко распространенный в промышленных приложениях алгоритм нечеткого вывода Э. Мамдани [13].

Математическое моделирование температурного контроля замороженного мясного сырья с использованием нечеткой модели осуществляли в вычислительной среде MATLAB (пакет Fuzzy Logic Toolbox)⁶.

Результаты исследования

В результате экспериментального изучения процесса одностадийного измельчения замороженного мяса установлено, что электромагнитный момент электродвигателя привода механизма резания измельчителя изменяется в рабочем режиме. Это можно подтвердить данными измерения электромагнитного момента приводного электродвигателя, приведенными на рисунке 3. Изменение электромагнитного момента (момента на валу) приводного электродвигателя механизма резания одностадийного измельчителя в рабочем режиме объясняется текстурной и структурной неоднородностью перерабатываемого мясного сырья. На рисунке 3 можно видеть этапы измельчения блочного мяса: от нулевого момента времени до 3,5 с – подача блока мяса на режущий вал (холостой ход измельчителя); с 3,5 с до 24 с – процесс измельчения сырья; с 24 с до 28 с – отвод подающего штока измельчителя в начальное положение (второй холостой ход).



Р и с. 3. Данные измерения электромагнитного момента приводного электродвигателя механизма резания одностадийного измельчителя в рабочем режиме

F i g. 3. Measurement data of the electromagnetic torque of the drive motor of the single-stage mincing mechanism in operating mode

⁶ Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с.; Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М. : Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.

Отметим также, что для промышленного образца одностадийного измельчителя предполагается использовать наборный режущий вал, составленный из стандартных фрез. Длина режущей части вала должна соответствовать максимальному линейному размеру блоков замороженного мяса по ГОСТ Р 54704-2011. В этом случае расчетная производительность процесса измельчения составляет 5300 кг/ч.

Учитывая данные экспериментального исследования, следует стабилизировать средствами ИСУ режимные параметры процесса резания мяса в целях получения гомогенного по размеру мясной стружки измельченного сырья.

Температурный режим поверхностного слоя мяса, прилегающего к зоне контакта с многолезвийным инструментом в рабочей камере измельчителя, может значительно отличаться от условий, определяющих температурный режим такого же слоя в блоке, находящемся вне измельчителя, например в напольной тележке. В нашей работе во время опытных измельчений на экспериментальной установке наблюдалось частичное размораживание поверхностных слоев мяса с выделением влаги. Отсюда следует задача определения температуры слоя мяса непосредственно в зоне измельчения для корректного учета изменений его пластических свойств при нагреве.

Для решения указанной задачи необходимо экспериментально измерить температуру в зоне контакта лезвия рабочего инструмента измельчителя с сырьем в начальный момент времени отделения мясной стружки от массива блока. Технически это возможно сделать бесконтактным способом в точке вхождения зуба инструмента в массив мясного блока. Далее расчетным способом определяется усредненная температура по дуге резания при допущении, что в центре блока первоначальная температура неизменна и равна температуре хранения сырья в морозильной камере перед измельчением.

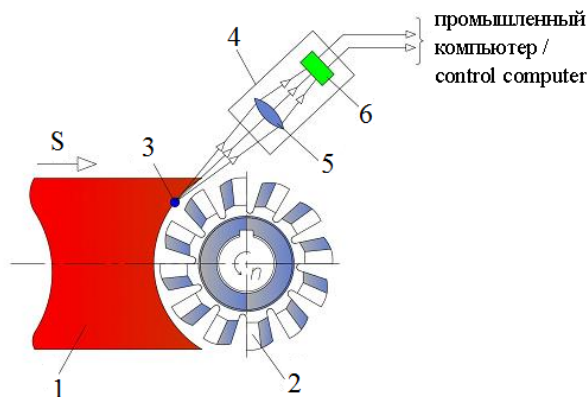
Метод бесконтактного измерения температуры в обрабатывающей промышленности представляет собой регистрацию теплового излучения отдельных участков детали или инструмента в процессе обработки. Предложенную схему измерения⁷ по указанному методу можно адаптировать для температурного контроля блочного мяса в рассматриваемом случае (рис. 4). При измельчении блока замороженного мяса 1 фрезерным валом измельчителя 2 тепловое излучение площадки контакта сырья с многолезвийным инструментом 3 аккумулируется в объективе 5 и передается в фоточувствительный элемент 6. Сигнал усиливается в электронном усилителе (на рисунке 4 не показан) измерительного устройства 4 и передается в конечном итоге в управляющую вычислительную машину (УВМ). Сигнал в ИК-диапазоне может приниматься с контактной площадки размером $0,04 \times 0,07$ мм при точности измерения $\pm 2 - 3\%$. Таким образом, схема измерения температуры пограничного слоя мяса может быть использована для реализации прогноза температуры сырья в зоне резания.

На основе рассмотренной схемы следует создать устройство измерения с применением современной инструментальной базы для решения задачи температурного контроля сырья.

Очевидно, что температура на поверхности слоя мяса, измеренная экспериментальным способом, отличается от температуры в центре этого же слоя мяса, то есть в центре мясного блока. В практике холодильной технологии существуют

⁷ Васин С. А., Верещака А. С., Кушнер В. С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М. : МГТУ им. Баумана, 2001г. 448 с.

приближения среднеобъемной температуры тел простой формы при допущении параболического распределения температур по сечению тела⁸. В рассматриваемом случае под сечением тела следует понимать поверхность резания мясного блока в текущий момент времени, которую представим как плоскопараллельную фигуру в виде сечения параллелепипеда – формы мясного блока.



Р и с. 4. Схема измерения температуры пограничного слоя: 1 – блок замороженного мяса; 2 – фрезерный вал измельчителя; 3 – участок поверхности резания мясного блока; 4 – измерительное устройство; 5 – объектив; 6 – датчик ИК-излучения; S – направление подачи блока сырья на фрезерный вал измельчителя; n – частота вращения фрезерного вала измельчителя

F i g. 4. Scheme of temperature measurement of boundary layer: 1 – block of frozen meat; 2 – milling shaft of the mincer; 3 – area of the mincing surface of the meat block; 4 – measuring device; 5 – lens; 6 – IR-sensor; S – direction of feeding the meat block to the milling shaft of the mincer; n – rotation frequency of the milling shaft of the mincer

Поместим начало системы координат в центр мясного блока, температуру в центре блока обозначим T_c . Ось «х» будет направлена по нормали к поверхности блока, температуру которой обозначим T_s . Расстояние от центра блока мяса до его поверхности обозначим $0,5H$, где H – высота блока промышленного типоразмера, равная высоте бруса. Отметим, что высота блока H соответствует ширине фрезерования при горизонтальном расположении режущего вала. В соответствии с принятым допущением о параболическом распределении температур по сечению блока температуру точки на поверхности резания с координатой «х» можно представить как:

$$T_x = T_s - (T_x - T_c) \frac{x^2}{(0,5H)^2}, \quad (1)$$

где T_x – температура в точке «х».

Решая уравнение (1) для множества точек в интервале $x_c < x < x_s$, где $x_c = 0$, $x_s = 0,5H$, получают массив значений температуры сечения блока мяса по дуге резания от поверхности до центра блока. Усредняя полученные значения, определяют среднюю температуру мяса поверхности резания перерабатываемого блока

⁸ Чижов Г. Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. М. : Пищевая промышленность, 1979. 302 с.

в текущий момент времени. Обозначим эту среднюю температуру как T_t , где t – текущий момент времени.

Ряд значений средней температуры поверхности резания для следующих друг за другом сечений мясного блока, последовательно срезаемых рабочим инструментом измельчителя в процессе измельчения сырья, представим в виде временного (динамического) ряда T . Каждый член (уровень) такого ряда связан с соответствующим моментом времени или временным интервалом. Уровни временного ряда T формируются под воздействием различных факторов. Некоторые из них, например структурная и текстурная неоднородность блочного мяса, имеют случайный характер.

Задачи исследования временных рядов группируются следующим образом:

1. Описание изменения анализируемого показателя (расчет среднего темпа роста; применение сглаживающих фильтров, уменьшающих колебания уровней ряда во времени; подбор кривых, характеризующих тенденцию развития и др.).
2. Объяснение механизма изменения анализируемого показателя (регрессионный анализ).
3. Статистическое прогнозирование (экстраполяция обнаруженных тенденций развития).

Для реализации температурного контроля сырья, перерабатываемого на технологической линии, необходимо решить задачу из третьей группы.

Под экстраполяцией в прогнозировании понимают продление в будущее тенденции, наблюдавшейся в прошлом [15]. В рассматриваемом случае необходимо оценить температуру T в процессе переработки блока мяса на несколько шагов вперед по временной шкале. Тогда задачу исследования временного ряда T можно сформулировать так: основываясь на данных измерения температуры поверхности блока сырья T_s при послойном его срабатывании на определенном временном промежутке, оценить на несколько шагов (несколько слоев мяса, последовательно отделяемых от массива блока) вперед во времени температуру T методом прогнозирования (экстраполяцией).

Как указывается в литературе [11; 12], экстраполяция базируется на следующих допущениях: во-первых, процесс изменения исследуемого параметра во времени можно охарактеризовать трендом, то есть плавной траекторией; во-вторых, принимается гипотеза об инерционности протекания исследуемого процесса (условия, определяющие тенденцию развития в прошлом, останутся без существенных изменений в будущем). В рассматриваемом случае эти требования к объекту исследования выполняются, поскольку, во-первых, переработка сырья на технологической линии проходит при неизменной температуре окружающей среды, оговоренной в Техническом регламенте Таможенного союза 034/2013 «О безопасности мяса и мясной продукции»; во-вторых, процесс измельчения сырья характеризуется стабилизацией параметров режима его резания в целях получения однородного по размеру мясной стружки измельченного продукта.

Экстраполяция временного ряда дает возможность получить как точечную прогностическую оценку, так и интервальную оценку (расчет доверительных интервалов прогноза) [16]. Точечная оценка для температурного контроля сырья не имеет практического интереса, так как температурное поле мясного блока является непрерывным. Кроме того, изменение структурно-механических свойств замороженного мяса, влияющих на его измельчение, характеризуется не пороговым (точечным) значением температуры мяса, а диапазоном значений температуры. Таким образом, для температурного контроля мяса следует выбрать расчет интервальной прогностической оценки.

Для краткосрочного прогнозирования временного ряда T выберем экстраполяцию по экспоненциальной средней. Под краткосрочным прогнозированием понимают расчет прогностической оценки на основе изолированного ряда динамики процесса без выделения и анализа тренда. Краткосрочность прогноза температурного контроля сырья обуславливается необходимостью оперативно оценить среднюю температуру ряда слоев мяса, которые предстоит отделить от массива мясного блока в процессе его измельчения. Следовательно, необходимо вычислить прогноз изменения указанной температуры на ограниченном количестве данных измерения температуры T_s , полученных в процессе измельчения сырья.

Экспоненциальная средняя временного ряда T_{tm} (сглаженное значение уровня ряда) определяется как:

$$T_{tm} = \sum_{r=0}^t \alpha (1-\alpha)^r T_{t-r}, \quad (2)$$

где T_{tm} – экспоненциальная средняя ряда T на момент времени t ; α – коэффициент, характеризующий вес текущего наблюдения (параметр сглаживания), $0 < \alpha < 1$, T_{t-r} – уровень ряда T , находящийся на расстоянии r от момента времени t .

Сумму (2) можно записать как:

$$T_{tm} = T_{(t-1)m} + \alpha (T_t - T_{(t-1)m}), \quad (3)$$

где T_t – фактический уровень ряда в момент времени t .

Если $T_{(t-1)m}$ считать прогнозом уровня ряда, то разность $(T_t - T_{(t-1)m})$ определяет погрешность этого прогноза. Тогда для краткосрочного прогнозирования оценка T_{tm} учитывает наблюдавшуюся в момент времени t ошибку прогноза. Таким образом, экспоненциальная средняя ряда адаптируется к новым условиям течения процесса изменения контролируемого параметра во времени. Под адаптивным прогнозированием понимается разработка прогноза с самообучением. Вычисляемые средние уровней ряда с каждым шагом во времени изменяются с учетом ошибки прогноза на предыдущем шаге. Отметим, что для ИСУ технологической линии производства мясных продуктов с применением одностадийного измельчения сырья характерна обучаемость системы в процессе функционирования [3].

Для разработки адаптивных прогностических моделей рассчитывают экспоненциальные средние более высоких порядков путем многократного экспоненциального сглаживания:

$$T_{tm}^{(k)} = \alpha T_{tm}^{(k-1)} + (1-\alpha) T_{(t-1)m}^{(k)}, \quad (4)$$

где k – порядок средней.

Как видно из формулы 4, в вычислении экспоненциальной средней на k этапе расчета используется полученное ранее значение экспоненциальной средней на $(k-1)$ этапе расчета. Такой последовательностью вычислений достигается многократное экспоненциальное сглаживание.

От точечных прогностических оценок (4) следует перейти к интервальной оценке:

$$T_{tm} \mp t_\alpha \sigma \sqrt{1 + \frac{\alpha}{2-\alpha}}, \quad (5)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение от T_m ; t_a – значение t -статистики Стьюдента.

Адаптивную модель прогнозирования на N шагов (во времени) вперед с использованием экспоненциальных средних первого и более высоких порядков можно записать в виде полинома степени k :

$$T_{(t+N)m} = a_t + b_t N + c_t N^2 + \dots + m_t N^k, \quad (6)$$

где $a_t, b_t, \dots, m_t$ – параметры прогнозирования, которые могут быть получены как линейные комбинации экспоненциальных средних соответствующих порядков.

Дисперсия прогноза (6) для записи доверительного интервала прогнозирования определяется по приближенным формулам, приведенным в литературе⁹.

Следует отметить, что продолжительность периода упреждения (N) должна превышать постоянную времени, определяемую инерционностью (механической и электромагнитной) объекта управления, то есть видами оборудования, комплектующими технологическую линию производства мясных продуктов и реализующими процесс измельчения сырья. Это необходимо для своевременного переключения режима резания сырья в соответствии с изменением температуры перерабатываемого мяса.

Этапы осуществления температурного контроля сырья можно представить алгоритмом функционирования и графически отобразить его в виде блок-схемы (рис. 5). После проведения измерений температуры мяса и аналитических расчетов с использованием результатов измерений управляющий компьютер без участия оператора принимает решение о необходимости изменения режима резания сырья с целью поддержания заданной степени его измельчения. Это решение принимается на основе экспертной базы знаний, хранящейся в памяти управляющего компьютера.

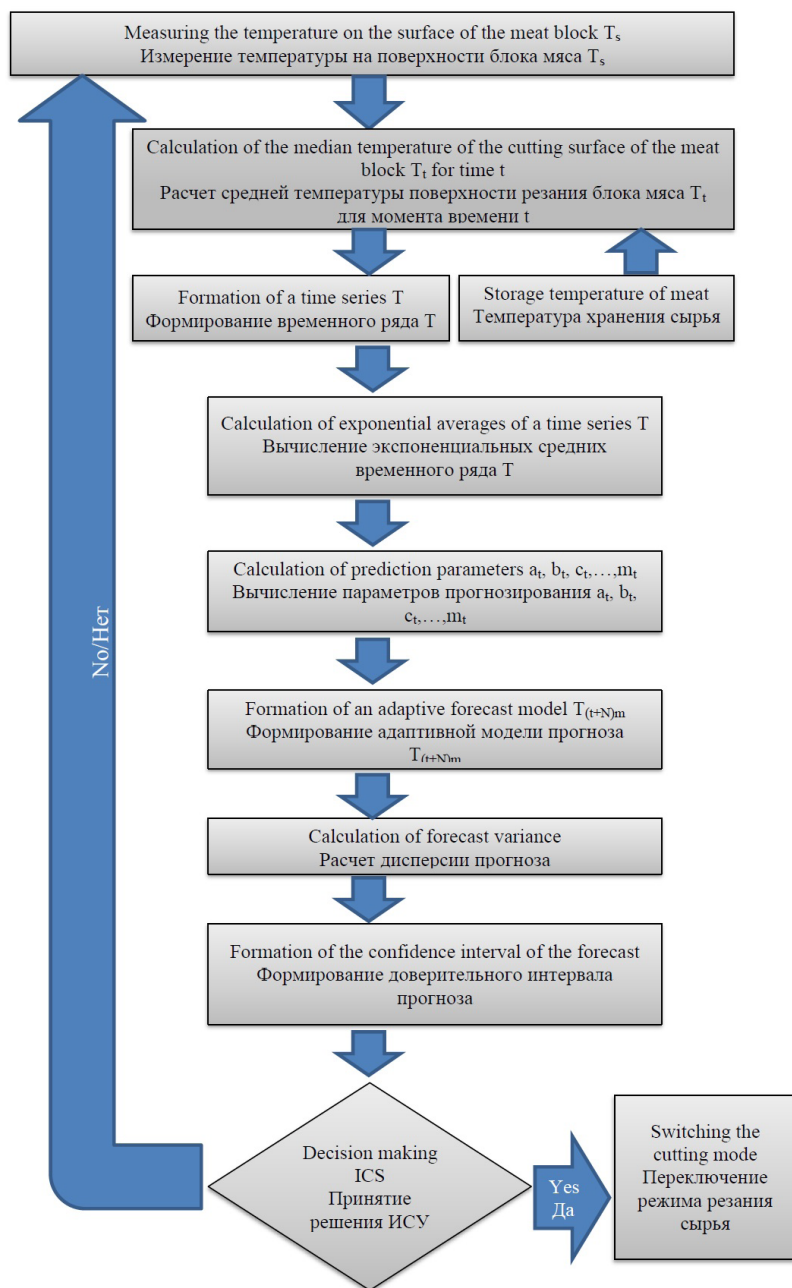
Известно, что изменения физико-механических свойств мяса при его измельчении в замороженном виде оказывают существенное влияние на режущую способность измельчителей, а также энергозатраты на осуществление процесса¹⁰, а температура замораживания сырья влияет на изменения коэффициента Пуассона (μ)¹¹.

Из результатов приведенных исследований видно, что структурно-механические свойства замороженного мяса, влияющие на процесс его измельчения, характеризуются температурными диапазонами, в которых их значения существенно изменяются. Таким образом, для температурного контроля сырья в процессе его измельчения следует рассматривать диапазоны изменения температуры замороженного мяса, причем для различных структурно-механических свойств границы этих диапазонов на температурной шкале могут быть совмещены. В этих условиях возникает неопределенность в установлении режимных параметров резания сырья в целях поддержания заданной степени его измельчения. Это обуславливает целесообразность применения нечеткой модели управления для реализации температурного контроля сырья в рассматриваемом случае.

⁹ Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М. : Финансы и статистика, 2003. 416 с.

¹⁰ Илюхин В. В. Физико-технические основы криоразделения пищевых продуктов. М. : Агропромиздат, 1990. 207 с.

¹¹ Чижилова Т. В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. 302 с.



Р и с. 5. Блок-схема температурного контроля
F i g. 5. Flowchart of temperature control

Правила нечеткого управления дают возможность использовать для контроля технологического оборудования полную информацию о его функционировании при различных режимах управления в зависимости от принятых условий (времени,

значений параметров технического объекта и т. п.). Такой подход к управлению технологическим процессом расширяет возможность влиять на объект управления, что отличает его от классических систем, работающих в области четкой логики¹². В рассматриваемом случае управляющее воздействие на объект управления (электромеханическую систему одностадийного измельчителя) следует формировать в зависимости от вычисленного прогноза температуры перерабатываемого мяса с учетом смежных границ температурных диапазонов, в которых структурно-механические свойства замороженного мяса могут иметь различные тенденции изменения своих значений.

Для моделирования работы ИСУ при формировании задания на установление режимных параметров процесса измельчения с применением адаптивной модели прогнозирования температуры замороженного мясного сырья разработали модель нечеткого управления. Для этой модели сформировали функции принадлежности входной и выходной переменных, а также базу правил. Входной переменной для модели является температура пограничного слоя мяса, прилегающего к зоне контакта с многолезвийным инструментом измельчителя. Предполагается, что конкретные значения указанной температуры определяются в результате аналитического расчета кратковременного прогноза с применением адаптивной модели, представленной выше. Нижняя граница в отрицательной области температур принята равной -8°C , так как мясо считается замороженным при достижении данной или более низкой температуры¹³. Верхней границей в области положительных температур определили плюс 3°C в случае предельного размораживания сырья, например, при длительном перерыве в работе технологической линии в условиях мясоперерабатывающего производства. Как показывает опыт одностадийного измельчения в лабораторных условиях, температура измельченного сырья находится в диапазоне $-1,5^{\circ}\text{C} \dots -3,5^{\circ}\text{C}$.

Для лингвистической переменной «температура» приняты следующие нечеткие терм-множества с соответствующими границами диапазонов: «отрицательная», «отрицательная малая», «нулевая», «положительная».

Выходной переменной нечеткой модели управления является частота вращения рабочего инструмента измельчителя, измеряемая в об/мин. Верхняя граница значений частоты вращения (2930 об/мин) определяется номинальной частотой вращения асинхронного короткозамкнутого электродвигателя привода механизма резания измельчителя. Нижняя граница частоты вращения определяется предельной малой частотой вращения режущего инструмента измельчителя для выработки тонко измельченного сырья, используемого в производстве колбасных изделий. В случае производства фарша для рубленых полуфабрикатов значение нижней границы диапазонов частоты вращения рабочего инструмента измельчителя может быть уменьшено.

Для лингвистической переменной «частота вращения» приняты следующие нечеткие терм-множества с соответствующими границами диапазонов: «малая», «средняя», «максимальная».

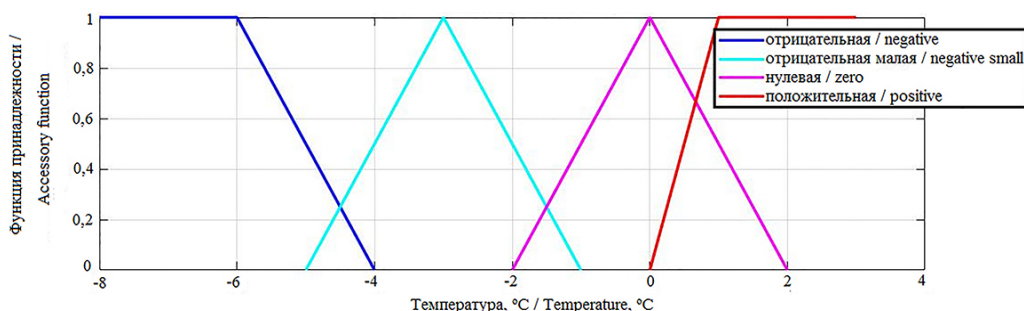
Для функций принадлежности входной и выходной переменных модели выбрана трапецевидная (*trapmf*) и треугольная (*trimf*) формы, которые следует отнести

¹² Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М.: Машиностроение-1. 2004. 397 с.

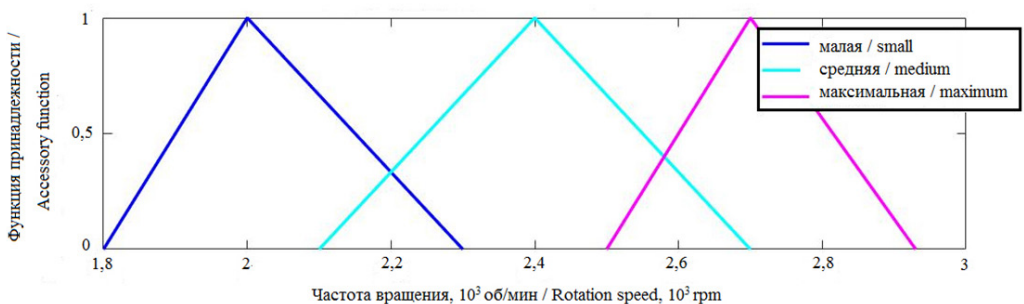
¹³ Технический регламент Таможенного союза «О безопасности мяса и мясной продукции» (ТР ТС 034/2013): принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 9 окт. 2013 г. № 68.

к кусочно-линейным функциям. Отметим, что в практике нечеткого моделирования такие функции используют для задания свойств множеств, которые характеризуют неопределенность вида: «приблизительно равно», «среднее значение», «расположен в интервале» и т. п. Таким образом, целесообразно использовать эти виды функции принадлежности для задания как температурных интервалов, так и интервалов изменения частоты вращения рабочего инструмента измельчителя.

На рисунках 6 и 7 приведены функции принадлежности лингвистических переменных «температура» и «частота вращения» для нечеткой модели.



Р и с. 6. Терм-множества температуры пограничного слоя мяса
F i g. 6. Therm-sets of the meat boundary layer temperature



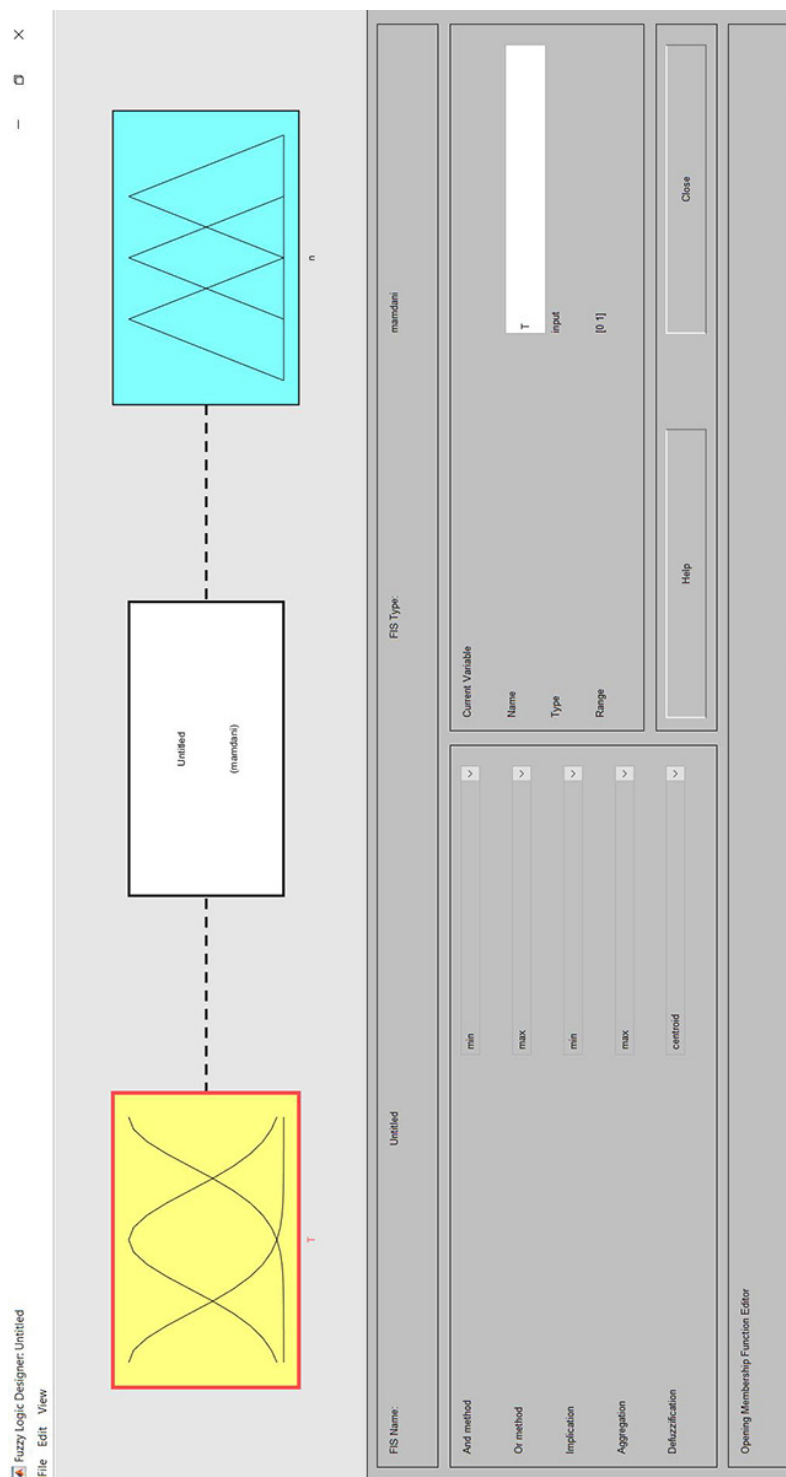
Р и с. 7. Терм-множества частоты вращения инструмента
F i g. 7. Term-sets of tool rotation speed

На рисунке 8 приведена схема модели.

Для нечеткой модели база правил составлена с учетом смежных (перекрывающихся) границ температурных диапазонов. Используется одна входная переменная «температура» и одна выходная переменная «частота вращения». Логическая взаимосвязь указанных переменных задается следующими правилами базы знаний:

1. Если T = «отрицательная» и T = «отрицательная малая», то n = «малая».
2. Если T = «отрицательная малая» и T = «нулевая», то n = «средняя».
3. Если T = «нулевая» и T = «положительная», то n = «максимальная».

Отдельные условия в приведенной базе правил связаны между собой логической конъюнкцией (логическим «И»). Это позволяет учесть смежные границы температурных диапазонов, где могут быть расположены значения вычисленного температурного прогноза.



Р и с. 8. Схема нечеткой модели. Принтскрин экрана программы MATLAB, пакет Fuzzy Logic Toolbox
 Fig. 8. Diagram of a fuzzy model. Printscreen of the MATLAB program, Fuzzy Logic Toolbox package

На рисунке 9 представлено формирование функции принадлежности термножества выходной величины «Максимальная».

Для моделирования принят алгоритм нечеткого вывода Э. Мамдани.

Дефазификация выходной переменной нечеткой модели (частоты вращения многолезвийного инструмента измельчителя) проведена с использованием метода центра тяжести.

На рисунках 10, 11 и 12 представлены этапы реализации алгоритма логического вывода по Э. Мамдани для трех значений температурного прогноза. Как видно из результатов моделирования, конечным этапом во всех трех случаях является дефазификация выходной переменной нечеткой модели температурного контроля сырья. В условиях функционирования технологической линии производства мясных продуктов полученные решения (результаты дефазификации) будут являться заданием для исполнительных приводов одностадийного измельчителя, комплектующего линию.

На рисунке 10 представлен логический вывод (решение) для значения входной переменной $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (значение выходной переменной модели равно $2\,520\text{ мин}^{-1}$), на рисунке 11 вывод для значения входной переменной $T = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (значение выходной переменной модели равно $2\,710\text{ мин}^{-1}$), на рисунке 12 вывод для значения входной переменной $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (значение выходной переменной модели равно $2\,240\text{ мин}^{-1}$). Отметим, что в последнем случае значение температуры принадлежит двум термножествам («отрицательная» и «отрицательная малая») одновременно, то есть находится в смежной области соседних температурных диапазонов.

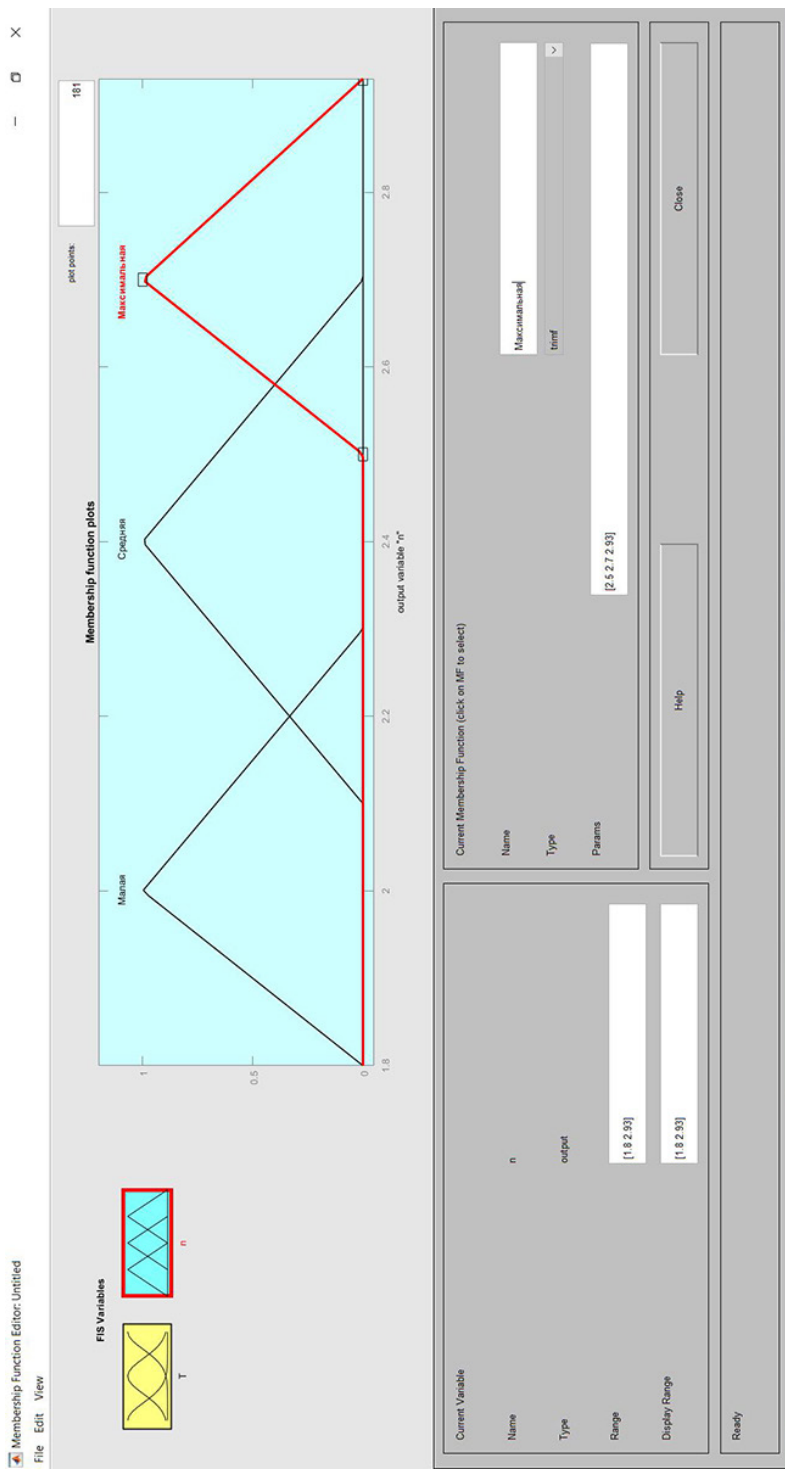
Так как база правил для нечеткой модели была составлена с применением логической конъюнкции («И»), компьютерная программа сформировала для используемой модели логический вывод (решение) для всего рассматриваемого температурного диапазона $-8\text{ }^{\circ}\text{C}...+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 13).

Как видно из рисунка 13, чем выше значение (в градусах) прогноза температуры пограничного слоя мяса, тем большее значение частоты вращения рабочего инструмента (скорости резания) одностадийного измельчителя устанавливает компьютерное управление.

Функциональная схема температурного контроля (рис. 14) отражает структуру нечеткой модели управления, используемой в рассматриваемом случае.

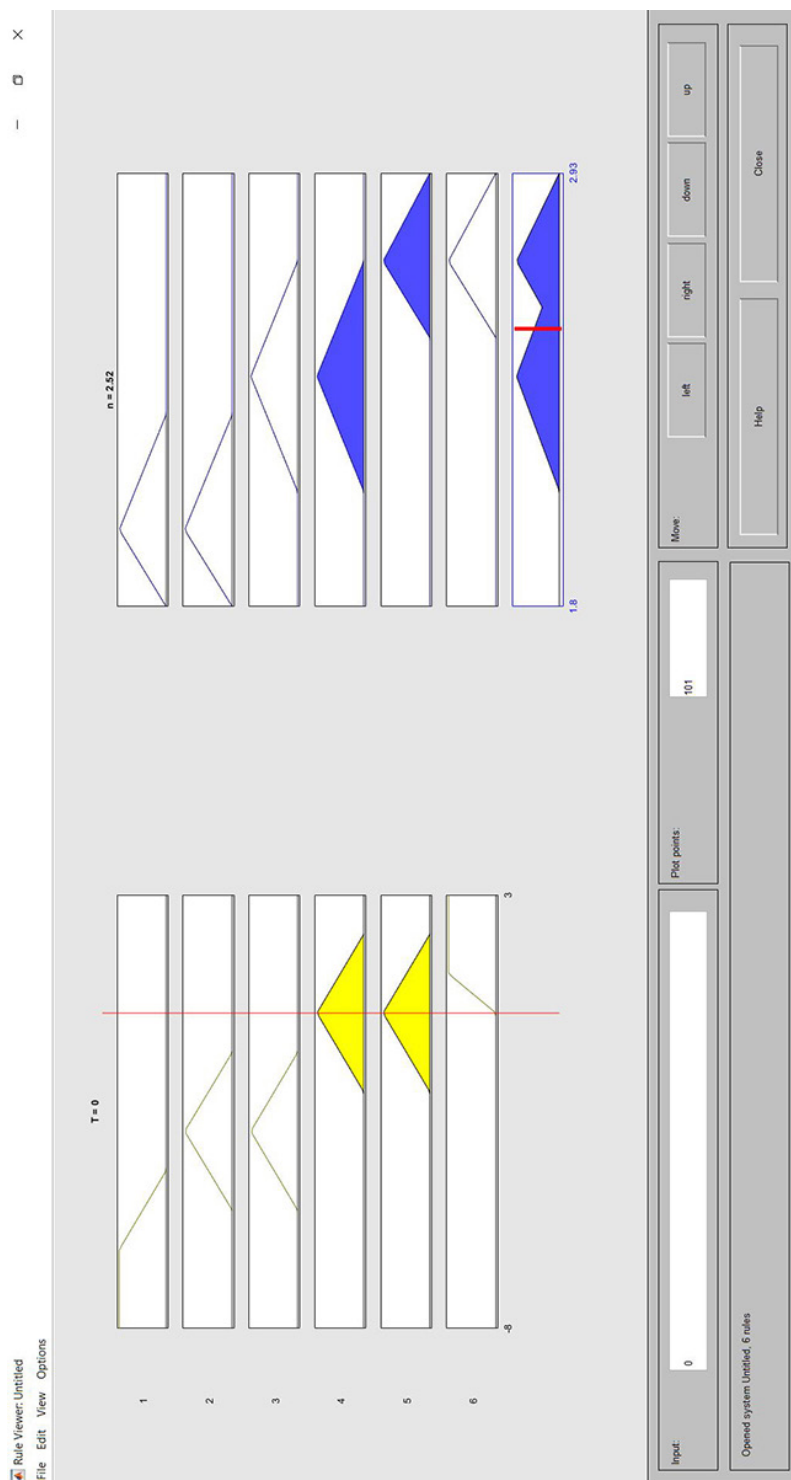
Блок фазификации (Fuzzification) вычисляет степень принадлежности $\mu(T)$ прогноза температуры мяса определенному нечеткому множеству (термножеству) на температурной шкале. Вычисленное значение степени принадлежности поступает на вход блока формирования логического решения (блок логического вывода – Inference), который вычисляет результирующую функцию принадлежности выходного значения нечеткой модели. В рассматриваемом случае база¹⁴ правил должна отражать практический опыт одностадийного измельчения при различной температуре замороженного мяса, подтвержденный микроструктурными исследованиями полученного продукта. Блок дефазификации (Defuzzification) на основе результирующей функции принадлежности вычисляет четкое числовое значение выходного параметра модели. Четким выходным параметром нечеткой модели температурного контроля сырья является скорость резания замороженного мяса, однозначно определяемая частотой вращения рабочего инструмента измельчителя. Задача контура управления (математической модели управления), работающего по законам четкой логики, заключается в том, чтобы свести к минимуму ошибку регулирования.

¹⁴ Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. 2004. 397 с.



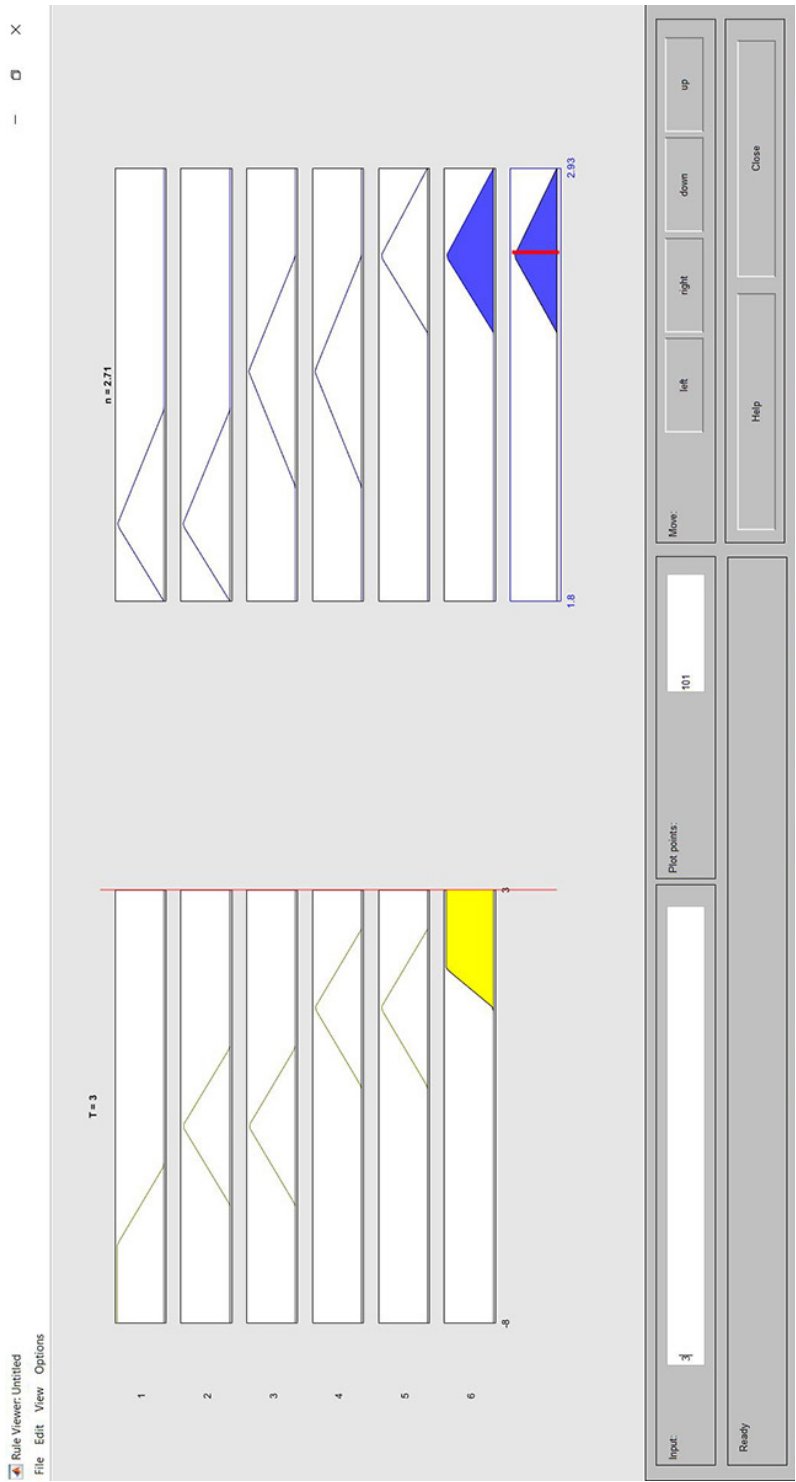
Р и с. 9. Формирование терм-множества выходной величины «Максимальная». Принтскрин экрана программы MATLAB, пакет Fuzzy Logic Toolbox

F i g. 9. Formation of the term-set of the output value "Maximum". Printscreens of the MATLAB program, Fuzzy Logic Toolbox package



Р и с. 10. Логический вывод (решение) для $T = 0^{\circ}\text{C}$, значение выходной переменной равно $2\,520\text{ мин}^{-1}$.
 Принтскрин экрана программы MATLAB, пакет Fuzzy Logic Toolbox

F i g. 10. Logical conclusion (solution) for $T = 0^{\circ}\text{C}$, the value of the output variable is $2\,520\text{ мин}^{-1}$.
 Printscreen of the MATLAB program,
 Fuzzy Logic Toolbox package



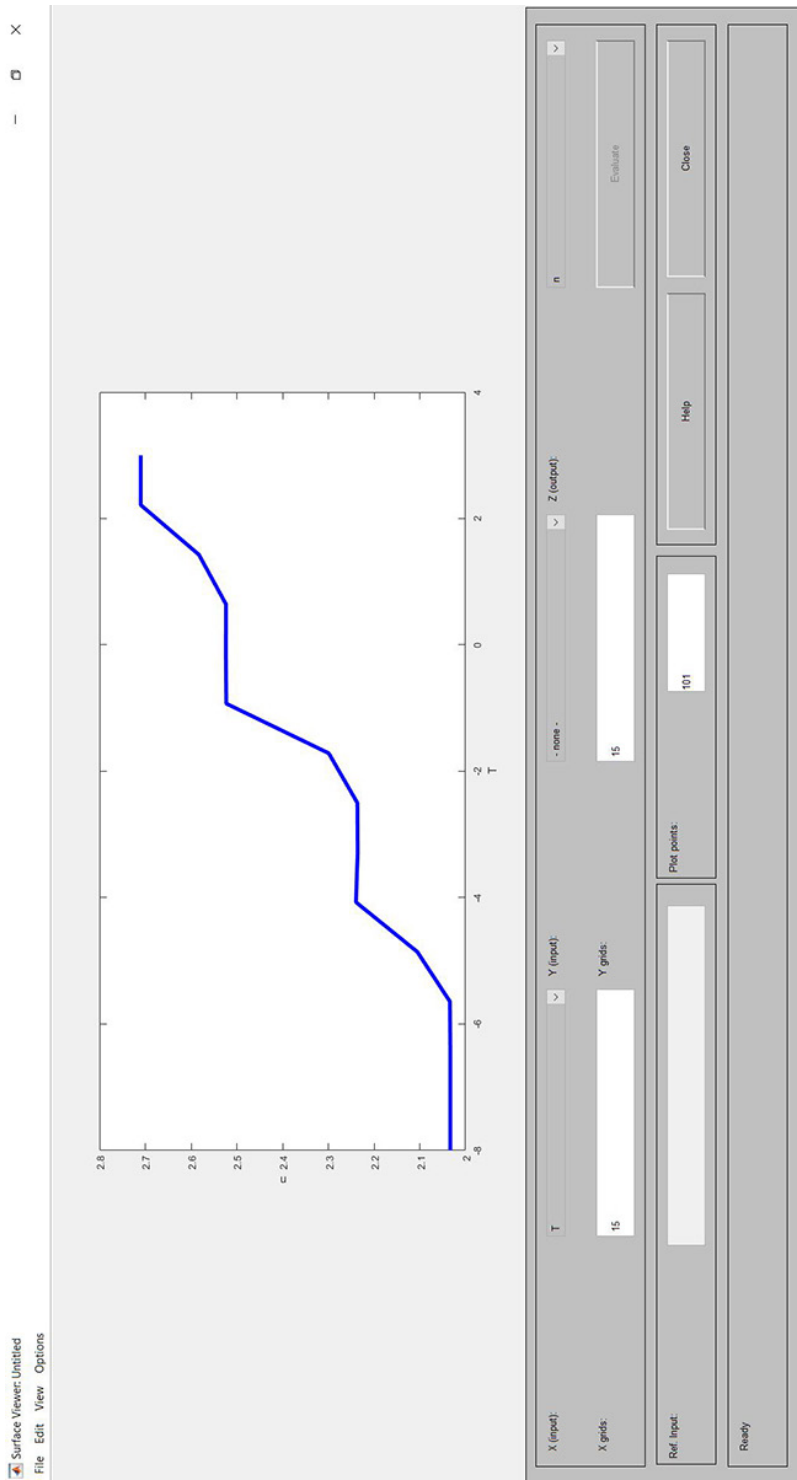
Р и с. 11. Логический вывод (решение) для $T = 3^{\circ}\text{C}$, значение выходной переменной равно $2\,710\text{ мин}^{-1}$.
Принтскрин экрана программы MATLAB, пакет Fuzzy Logic Toolbox

F i g. 11. Logical conclusion (solution) for $T = 3^{\circ}\text{C}$, the value of the output variable is $2\,710\text{ min}^{-1}$.
Printscreen of the MATLAB program, Fuzzy Logic Toolbox package

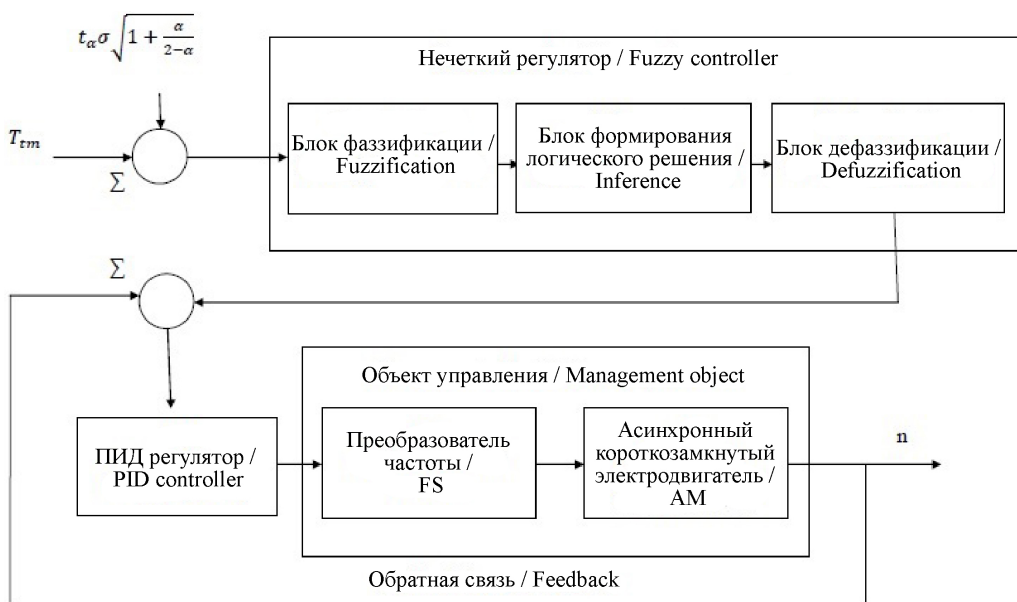


Р и с. 12. Логический вывод (решение) для $T = -4,5^{\circ}\text{C}$, значение выходной переменной равно $2\,240\text{ мин}^{-1}$. Принтскрин экрана программы MATLAB, пакет Fuzzy Logic Toolbox

F i g. 12. Logical conclusion (solution) for $T = -4,5^{\circ}\text{C}$, the value of the output variable is $2\,240\text{ min}^{-1}$. Printscreen of the MATLAB program, Fuzzy Logic Toolbox package



Р и с. 13. Логический вывод (решение) для всего рассматриваемого температурного диапазона. Принтскрин экрана программы MATLAB, пакет Fuzzy Logic Toolbox
Fig. 13. Logical conclusion (solution) for the entire temperature range under consideration. Printscreen of the MATLAB program, Fuzzy Logic Toolbox package



Р и с. 14. Функциональная схема температурного контроля

Fig. 14. Functional scheme of temperature control (PID controller – Proportional-integral-differential controller; FC – Frequency converter; AM – Asynchronous short-circuit motor)

В функциональной схеме температурного контроля (рис. 14) в качестве входной переменной нечеткой модели управления принято максимальное значение интервальной оценки температурного прогноза.

Обсуждая алгоритм функционирования предлагаемой системы температурного контроля, следует отметить его особенности в сравнении с традиционными техническими решениями в этой области. Системе придается функция непрерывного автоматизированного контроля температурного режима измельчения сырья под управлением промышленного компьютера. Это позволит уже на первом этапе переработки мяса обеспечить производство гомогенизированного измельченного продукта, что является обязательным условием получения высококачественной готовой продукции. Отметим, что на технологических линиях стандартной комплектации температура сырья контролируется на последующих стадиях его технологической обработки¹⁵.

Обсуждение и заключение

Реализация гибридного управления одностадийным измельчением замороженного мясного сырья в промышленных условиях функционирования технологической линии непрерывного действия производства мясных продуктов потребует расширения и уточнения условий базы правил для нечеткой модели управления. Это связано с различными температурными условиями хранения сырья в морозильных камерах мясоперерабатывающих производств. Очевидно, что при низких

¹⁵ Feiner G. Meat Products Handbook: Practical Science and Technology. Boca Raton : CRC Press, 2006. 672 p.; Lonergan S. M., Topel D. G., Marple D. N. Chapter 14 – Sausage Processing and Production / The Science of Animal Growth and Meat Technology (2nd ed.). San Diego : Academic Press, 2018. P. 229–253.

температурах хранения (например, $-25...-30^{\circ}\text{C}$) температурный диапазон изменения входной переменной «температура» нечеткой модели должен включать в себя указанные значения и далее по температурной шкале в направлении повышения температуры. Для выходной переменной нечеткой модели (частоты вращения многолезвийного инструмента измельчителя) в базу правил должны быть введены соответствующие входной переменной терм-множества с заданными функциями принадлежности. Используемая в приведенной выше нечеткой модели база знаний была сформирована для измельчения экспериментальных блоков замороженного мяса в лабораторных условиях.

Конечной целью температурного контроля сырья на первичной стадии его переработки является стабильность получения гомогенизированного измельченного продукта. Производство гомогенизированного по характерному размеру частиц продукта вследствие стабилизации степени измельчения сырья будет способствовать повышению качества готовой продукции, как это было указано выше. Однако результаты температурного контроля можно использовать и для дальнейшей технологической обработки измельченного мяса. В результате применения на первом этапе обработки сырья адаптивной прогностической модели контроля температуры мяса управляющий компьютер ИСУ может оценить температуру измельченного сырья в определенном его объеме, загружаемом в рецептурную мешалку. Используя полученную информацию и знания о химическом составе мяса, ИСУ может осуществить оптимальное сочетание всех ингредиентов фарша заданной пищевой ценности. Таким образом, предлагаемый температурный контроль может иметь многоцелевое назначение.

Выше отмечалось, что ИСУ процессом одностадийного измельчения, используя математическую модель, может рассчитать границы «коридора», в котором будет находиться размер получаемой мясной стружки с определенной доверительной вероятностью. Рассматриваемое гибридное управление позволит сделать эти расчеты более точными. Можно сказать, что управляющий компьютер «увидит» размер частиц, температуру, химический состав измельченного мясного сырья. Все указанные характеристики сырья искусственный интеллект рассчитывает без участия человека-оператора. Это дает возможность полностью автоматизировать дальнейшую технологическую обработку измельченного мяса с целью производства готовой продукции гарантированно высокого качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А. А. Модель управления подачей при объемном фрезеровании на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. 2019. № 2. С. 32–34. EDN: [ZAIAWL](#)
2. Кузнецов П. М., Белоусов Н. А., Ягопольский А. Г. Управление точностью траектории движения рабочего органа станка с ЧПУ // СТИН. 2021. № 7. С. 2–4. EDN: [YREUTE](#)
3. Mathematical Simulation of One-Stage Grinding of Products Frozen in Blocks / V. I. Ivashov [et al.] // News of the Academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. 2018. Vol. 5, Issue 431. P. 48–65. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.9>
4. Статистический анализ размеров мясной стружки / В. И. Ивашов [и др.] // Все о мясе. 2015. № 4. С. 28–29. EDN: [UFENMF](#)
5. Методы входного контроля блочного мяса на технологических линиях / Б. Р. Каповский [и др.] // Мясная индустрия. 2017. № 5. С. 28–31. EDN: [YNWHFD](#)

6. Zadeh L. A. Fuzzy Sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, Issue 3. P. 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x)
7. Birle S., Hussein M. A., Becker T. Fuzzy Logic Control and Soft Sensing Applications in Food and Beverage Processes // Food Control. 2013. Vol. 29, Issue 1. P. 254–269. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.06.011>
8. Perrot N., Baudrit C. Intelligent Quality Control Systems in Food Processing Based on Fuzzy Logic // Robotics and Automation in the Food Industry. 2013. P. 200–225. <https://doi.org/10.1533/9780857095763.1.200>
9. Алексеев Г. В., Аксенова О. А., Дерканосова А. А. Оптимизация рецептуры кормов непродуктивных животных с помощью математического моделирования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2015-1-28-35>
10. Application of Fuzzy Logic in Sensory Evaluation of Food Products: a Comprehensive Study / K. Vivek [et al.] // Food and Bioprocess Technology. 2020. Vol. 13. P. 1–29. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02337-4>
11. Канторович Г. Г. Анализ временных рядов // Экономический журнал. 2002. № 1. С. 87–110. EDN: QDFPSH
12. Сунчалин А. М., Сунчалина А. Л. Обзор методов и моделей прогнозирования финансовых временных рядов // Хроноэкономика. 2020. № 1 (22). С. 26–30. EDN: ATTSEI
13. Mamdani E. H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1974. Vol. 121, Issue 12. P. 1585–1588. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>
14. Pislaru C., Ford D. G., Holroyd G. Hybrid Modelling and Simulation of a Computer Numerical Control Machine tool feed drive // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2004. Vol. 218, Issue 2. P. 111–120. <https://doi.org/10.1177/095965180421800205>
15. Quantitative Technology Forecasting: A Review of Trend Extrapolation Methods / P.-H. Tsai [et al.] // International Journal of Innovation and Technology Management. 2023. Vol. 20, Issue 4. Article no. 2330002. <https://doi.org/10.1142/S0219877023300021>
16. Armstrong, J. S. Extrapolation for Time-Series and Cross-Sectional Data // International Series in Operations Research & Management Science. 2001. Vol. 30. P. 217–243. https://doi.org/10.1007/978-0-306-47630-3_11

Поступила в редакцию 03.07.2023; поступила после рецензирования 24.08.2023; принята к публикации 10.09.2023

Об авторах:

Каповский Борис Романович, кандидат технических наук, научный сотрудник Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова (109316, Российская Федерация, г. Москва, ул. Талалихина, д. 26), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2964-7177>, Researcher ID: AER-9531-2022, b.kapovskii@fneps.ru

Пчелкина Виктория Александровна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Экспериментальной клиники-лаборатории биологически активных веществ животного происхождения Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова (109316, Российская Федерация, г. Москва, ул. Талалихина, д. 26), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8923-8661>, Researcher ID: M-4413-2016, v.pchelkina@fneps.ru

Дыдыкин Андрей Сергеевич, доктор технических наук, руководитель отдела «Функциональное и специализированное питание» Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова (109316, Российская Федерация, г. Москва, ул. Талалихина, д. 26), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0208-4792>, Researcher ID: G-5020-2017, a.didikin@fneps.ru



Заявленный вклад авторов:

Б. Р. Каповский – формулирование цели, задачи исследования, проведение экспериментальных исследований, анализ результатов.

В. А. Пчелкина – работа над текстом статьи, сбор и обработка материалов.

А. С. Дыдыкин – общее руководство проектом, формулирование основной концепции исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Orlov A.A. Feed Control Model for Volumetric Milling on CNC Machines. *Vestnik Mashinostroeniya. Bulletin of Mechanical Engineering*. 2019;(2):32–34. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [ZAIAWL](#)
2. Kuznetsov P.M., Belousov N.A., Yagopolskiy A.G. Control of the Accuracy of the Trajectory of the Movement of the Working Body of the CNC Machine. *STIN (Machines and Tools)*. 2021;(7):2–4. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [YREUTE](#)
3. Ivashov V.I., Kapovsky B.R., Plyasheshnik P.I., Pchelkina V.A., Iskakova E.L., Nurmukhanbetova D.E. Mathematical Simulation of One-Stage Grinding of Products Frozen in Blocks. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2018;5(431):48–65. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.9>
4. Ivashov V.I., Zaharov A.N., Kapovskiy B.R., Kozhevnikova O.E., Pchelkina V.A. Statistical Analysis of the Size of Meat Chips. *All about Meat*. 2015;(4):28–29 (In Russ., abstract in Eng.). EDN: [UFENMF](#)
5. Kapovskiy B.R., Pchelkina V.A., Plyasheshnik P.I. Lazarev A.A., Dydykin A.S. Methods of Input Control of Block Meat on Production Lines. *Meat Industry*. 2017;(5):28–31. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [YNWHFD](#)
6. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965;8(3):338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x)
7. Birle S., Hussein M.A., Becker T. Fuzzy Logic Control and Soft Sensing Applications in Food and Beverage Processes. *Food Control*. 2013;29(1):254–269. <https://doi.org/10.1016/j.food-cont.2012.06.011>
8. Perrot N., Baudrit C. Intelligent Quality Control Systems in Food Processing Based on Fuzzy Logic. *Robotics and Automation in the Food Industry*. 2013; p. 200–225. <https://doi.org/10.1533/9780857095763.1.200>
9. Alekseev G.V., Aksenova O.I., Derkanosova A.A. Optimization of Feed for Unproductive Animals with the Help of Mathematical Modeling. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015;(1):28–35. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2015-1-28-35>
10. Vivek K., Subbarao K., Routray W., Kamini N.R., Dash K.K. Application of Fuzzy Logic in Sensory Evaluation of Food Products: a Comprehensive Study. *Food and Bioprocess Technology*. 2020;13:1–29. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02337-4>
11. Kantorovich G.G. Time Series Analysis. *Economic Journal*. 2002;(1):87–110. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [QDFPSH](#)
12. Sunchalin A.M., Sunchalina A.L. Overview of Methods and Models for Forecasting Financial Time Series. *Chronoeconomics*. 2020;(1):26–30. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [ATTSEI](#)
13. Mamdani E.H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974;121(12):1585–1588. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>
14. Pislaru C., Ford D.G., Holroyd G. Hybrid Modelling and Simulation of a Computer Numerical Control Machine Tool Feed Drive. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2004;218(2):111–120. <https://doi.org/10.1177/095965180421800205>

15. Tsai P.-H., Berleant D., Segall R., Aboudja H., Batthula V.J.R., Duggirala S, et al. Quantitative Technology Forecasting: A Review of Trend Extrapolation Methods. *International Journal of Innovation and Technology Management*. 2023;20(4):2330002. <https://doi.org/10.1142/S0219877023300021>
16. Armstrong J.S. Extrapolation for Time-Series and Cross-Sectional Data. *International Series in Operations Research & Management Science*. 2001;30:217–243. doi: https://doi.org/10.1007/978-0-306-47630-3_11

Submitted 03.07.2023; revised 24.08.2023; accepted 10.09.2023

About the authors:

Boris R. Kapovskiy, Cand.Sci. (Engr.), Researcher of the Department of Functional and Specialized Nutrition, V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems (26 Talalikhina St., Moscow 109316, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2964-7177>, Researcher ID: AER-9531-2022, b.kapovski@fncps.ru

Viktoriya A. Pchelkina, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher, Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems (26 Talalikhina St., Moscow 109316, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8923-8661>, Researcher ID: M-4413-2016, v.pchelkina@fncps.ru

Andrey S. Dydykin, Dr.Sci. (Engr.), Director of the Department of Functional and Specialized Nutrition, V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems (26 Talalikhina St., Moscow 109316, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0208-4792>, Researcher ID: G-5020-2017, a.didikin@fncps.ru

Authors contribution:

B. R. Kapovskiy – formulating the goal and objectives of the study, conducting an experimental study, analyzing the results.

B. A. Pchelkina – writing the text of the article, material collection and processing.

A. S. Dydykin – general project management, formulating the main research concept.

All authors have read and approved the final manuscript.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 628.993:631.544.4

doi: [10.15507/2658-4123.033.202304.585-598](https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.585-598)

Оригинальная статья



Разработка светодиодного фитооблучателя для выращивания растений в теплицах

А. А. Калабкин , Е. А. Кузнецов, С. Н. Ивлиев,
А. А. Ашрятов, В. А. Калабкин, А. С. Мусатов

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

 sskalabkin@yandex.ru

Аннотация

Введение. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективное выращивание растений в теплицах, является освещение. В контексте этой задачи светодиодные фитооблучатели представляют собой перспективное решение, позволяющее точно регулировать параметры света, необходимые для оптимального фотосинтетического процесса.

Цель статьи. Разработать и исследовать светодиодный фитооблучатель с оптимальным спектром и интенсивностью света для обеспечения эффективного роста, развития и фотосинтеза растений в теплицах.

Материалы и методы. Разработка светодиодного фитооблучателя была выполнена в соответствии с нормативными стандартами, которые определяют основные требования в области светотехники для фитоосвещения: ГОСТ Р 57671-2017 и ГОСТ Р 58461-2019. Приведена последовательность этапов разработки, согласно которой осуществлялась разработка данного фитооблучателя.

Результаты исследования. В качестве источника излучения был выбран светодиод Full Spectrum-1 (Китай) с двумя выраженными максимумами излучения 440 нм и 642 нм. Для фитооблучателя был выбран прожекторный корпус, позволяющий точно направлять свет на растения, обеспечивая тем самым максимальную эффективность фотосинтеза и роста. Анализ результатов трассировки лучей в TracePro показал, что модель светодиодного фитооблучателя имеет светораспределение близкое к косинусному типу кривой силы света (далее – КСС). Энергетический поток излучения составил 4,14 Вт, фотосинтетический поток фотонов – 16,6 мкмоль/с.

Обсуждение и заключение. Разработанный светодиодный фитооблучатель имеет величину фотосинтетического потока фотонов, равную 16,2 мкмоль/с при потребляемой мощности 8,8 Вт. Фотосинтетическая эффективность фитооблучателя составила 1,84 мкмоль/Дж. Таким образом, данный фитооблучатель возможно использовать

© Калабкин А. А., Кузнецов Е. А., Ивлиев С. Н., Ашрятов А. А., Калабкин В. А., Мусатов А. С., 2023



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

для эффективного процесса выращивания растений в теплицах, обеспечивая оптимальные условия освещения и способствуя повышению урожайности и качества сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: светодиодный фитооблучатель, мощность, энергетический поток излучения, спектральное распределение излучения, кривая силы света, фотосинтетический поток фотонов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Разработка светодиодного фитооблучателя для выращивания растений в теплицах / А. А. Калабкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 585–598. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.585-598>

Original article

The Development of LED Grow Light for Greenhouse Cultivation

A. A. Kalabkin[✉], E. A. Kuznetsov, S. N. Ivliyev, A. A. Ashryatov, V. A. Kalabkin, A. S. Musatov

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

[✉] sskalabkin@yandex.ru

Abstract

Introduction. Lighting is one of the key factors influencing the efficient greenhouse cultivation. In this context, LED grow lights are an innovative solution that allows users to precisely adjust the light parameters necessary for optimal photosynthetic processes.

Aim of the Article. The aim of the work is developing and testing the LED grow light with optimal spectrum and light intensity to ensure efficient growth, development and photosynthesis of plants in greenhouses.

Materials and Methods. The LED grow light was developed in accordance with the regulatory standards that define the basic requirements in light technology for plant growth: GOST R 57671-2017 and GOST R 58461-2019. There is presented the sequence of development stages, according to which this grow light was developed.

Results. As the light source, there was chosen the Full Spectrum-1 LED (China) with two prominent emission peaks at 440 nm and 642 nm. For the grow light, a spotlight housing was selected to direct light precisely onto the plants, thereby ensuring maximum efficiency of photosynthesis and growth. The analysis of ray tracing results in TracePro showed that the LED grow light model has a light distribution close to the cosine type. The radiant flux of emission was 4.14 watts, and the photosynthetic photon flux was 16.6 $\mu\text{mol/s}$.

Discussion and Conclusion. The developed LED grow light has a photosynthetic photon flux of 16.2 $\mu\text{mol/s}$ at a power consumption of 8.8 watts. The photosynthetic efficiency of the grow light was 1.84 $\mu\text{mol/J}$. Thus, this grow light can be used for the efficient greenhouse cultivation, providing optimal lighting conditions and contributing to increased crop yield and the quality of agricultural crops.

Keywords: LED grow light, power, radiant flux, spectral emission distribution, light intensity curve, photosynthetic photon flux

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

For citation: Kalabkin A.A., Kuznetsov E.A., Ivliyev S.N., Ashryatov A.A., Kalabkin V.A., Musatov A.S. The Development of LED Grow Light for Greenhouse Cultivation. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):585–598. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.585-598>

Введение

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективное выращивание растений в теплицах, является освещение [1]. Свет – это источник энергии, необходимой для фотосинтеза, процесса, который лежит в основе роста и развития растений [2]. В последние десятилетия светодиодные технологии значительно продвинулись и стали одним из наиболее эффективных и энергосберегающих способов обеспечения растений светом с необходимым спектральным составом [3; 4]. Это стало возможным благодаря разработке светодиодных фитооблучателей, которые адаптированы для фотосинтеза и оптимизированы для выращивания растений в тепличных условиях [5; 6].

Спектр излучения светодиодных фитооблучателей представляет собой основополагающий фактор, определяющий эффективность роста и развития растений [7]. Излучение в диапазоне длин волн около 400–500 нм играет важную роль в фотосинтезе, стимулирует образование органических веществ и управляет темпами развития растений. Синее излучение, вызывая образование ингибиторов роста в листьях, замедляет возрастание побегов и способствует формированию низкорослых растений¹.

Излучение в красном диапазоне спектра около 600–700 нм позволяет обеспечить эффективный фотосинтез и достичь высокой продуктивности растений, способствуя увеличению биомассы, ускорению прорастания, цветения и плодоношения.

Современные светодиодные фитооблучатели позволяют обеспечить излучение необходимого спектрального состава с возможностью точного регулирования интенсивности света² [8]. Это позволяет исследователям и агрономам создавать оптимальные условия для разных фаз роста растений, оптимизировать фотосинтетическую активность и повышать урожайность и качество продукции.

Обзор литературы

Основные светотехнические характеристики светодиодных фитооблучателей включают в себя спектральное распределение искусственного излучения, облученность и продолжительность облучения (фотопериод).

Требуемый спектр излучения для выращивания растений можно получить несколькими способами. В одном из исследований [8] осуществляется оценка радиационной среды, формируемой с помощью фитооблучателя на основе узкополосных светодиодов. Спектр излучения фитооблучателя с такими светодиодами представляет собой набор линий излучения, каждая из которых соответствует определенной длине волны. Таким образом, требуемый спектр излучения получается за счет комбинирования излучений узкополосных светодиодов [9; 10]. Интенсивностью узкополосных светодиодов можно управлять по отдельности, что позволяет точно регулировать спектральный состав и интенсивность света, подаваемого на растения. Гибкость в управлении спектром излучения имеет ключевое значение для оптимизации фитооблучения в различных стадиях роста растений и для различных видов культур. Например, в разные периоды роста растений требуется различная комбинация синего и красного света, а также других цветовых диапазонов, чтобы

¹ Справочная книга по светотехнике. М. : Группа компаний Море, 2019. 892 с. URL: http://krispen.ru/knigi/ajzenberg_01.pdf (дата обращения: 01.08.2023).

² Богомолов С. С., Вендин С. В. Влияние излучения светодиодов узкополосного спектра на рост растений // Материалы XXV Международной научно-производственной конференции «Роль науки в удвоении валового регионального продукта». 2021. С. 69. URL: <https://bsaa.edu.ru/upload/Том 1 ИПС конференция.pdf#page=69> (дата обращения: 01.08.2023).

стимулировать определенные физиологические процессы: фотосинтез, цветение и формирование плодов [11].

Другой способ получения требуемого спектра излучения заключается в использовании светодиода на основе кристалла синего излучения и красного люминофора. Коротковолновое синее излучение светодиода (в интервале от 400 нм до 480 нм) попадает на люминофор, после чего преобразуется в длинноволновое с максимумом излучения в интервале от 620 нм до 700 нм [12]. Также использование светодиодов с люминофором дешевле, чем использование нескольких узкополосных светодиодов. Однако такая технология имеет ряд недостатков:

- снижение эффективности в области ФАР в результате преобразования света в слое люминофора;

- сложность равномерного нанесения слоя люминофора на поверхность кристалла, что приводит к неравномерному излучению света;

- с течением времени и под воздействием излучения кристалла светодиода происходит деградация люминофора, что приводит к снижению качественных светотехнических параметров светодиода [13].

Фотосинтетическая эффективность современных светодиодных фитооблучателей превышает уровень традиционных натриевых [14]. Согласно данным [15], фотосинтетическая эффективность натриевых ламп низкого давления в трубчатых колбах составляет от 1,7 до 2,1 мкмоль/Дж. В тоже время фотосинтетическая эффективность квазимонохроматических светодиодов ведущих производителей составляет от 0,6 мкмоль/Дж до 3,18 мкмоль/Дж. Это достигается благодаря тому, что светодиоды предоставляют оптимальный спектральный состав излучения, который максимально соответствует потребностям растений в различных фазах их жизненного цикла. В сравнении с натриевыми лампами, светодиодные фитооблучатели более эффективны в использовании энергии, что снижает затраты на освещение и содействует экологической устойчивости сельского хозяйства.

Основным недостатком светодиодных фитооблучателей является то, что начальные инвестиции при покупке светодиодных фитооблучателей могут быть значительными, что в результате может ограничивать доступность данной технологии для небольших сельскохозяйственных предприятий. Однако стоит отметить, что в долгосрочной перспективе эти инвестиции могут окупиться благодаря существенной экономии электроэнергии и продолжительному сроку службы светодиодных фитооблучателей [16].

Материалы и методы

Для разработки светодиодного фитооблучателя были использованы нормативные стандарты, которые определяют основные требования в области светотехники для фитоосвещения: ГОСТ Р 57671-2017³ и ГОСТ Р 58461-2019⁴.

Процесс разработки облучателя был выполнен в соответствии с последовательностью следующих этапов:

- создание трехмерных моделей компонентов облучателя с использованием программы КОМПАС-3D⁵;

³ ГОСТ Р 57671-2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия : дата введения 2017-12-01. М. : Стандартинформ, 2017. 7 с.

⁴ ГОСТ Р 58461-2019. Освещение растений в сооружениях защищенного грунта. Термины и определения : дата введения 2020-01-01. М. : Стандартинформ, 2019. 20 с.

⁵ Система трехмерного моделирования КОМПАС-3D // АСКОН. URL: <https://ascon.ru/products/7/review> (дата обращения: 06.08.2023).

- импорт полученных трехмерных моделей в программу TracePro⁶ и задание оптических свойств материалам и поверхностям облучателя;
- трассировка лучей и анализ полученных результатов;
- осуществление сравнительного анализа светотехнических характеристик, полученных в ходе трассировки лучей и лабораторных измерений реального прототипа.

Процесс трассировки лучей в программе TracePro был осуществлен с помощью метода Монте-Карло. Данный метод является численным подходом, используемым для решения сложных задач, включая моделирование световых и оптических явлений. Метод Монте-Карло позволяет эффективно моделировать сложные оптические системы и рассчитывать основные светотехнические параметры [17].

Исследование характеристик прототипа фитооблучателя было проведено в лаборатории Центра коллективного пользования «Светотехническая метрология» (при Институте электроники и светотехники МГУ им. Н. П. Огарёва)⁷. Для измерения светотехнических характеристик ламп согласно ГОСТ Р 55702-2020⁸ была использована фотоколориметрическая измерительная установка от фирмы Gooch & Housego. Данная установка включает фотометрический шар OL IS7600, многоканальный спектрорадиометр OL 770 UV/VIS, оптоволоконный кабель 770–7G–3.0, прецизионный источник постоянного тока OL410–200 PRECISION LAMP SOURCE (используемый для питания вспомогательной лампы AUX LAMP A180), арматуру для крепления ламп, регулируемый автотрансформатор (для изменения напряжения питающей сети), блок мультиметров UNI-T UTD890D и компьютер [18].

Фитофотометрическая оценка излучения фитооблучателя была основана на эффективной системе величин, оценивающей излучение с помощью селективной функции фотосинтезной эффективности.

Расчет фотосинтетического потока фотонов фитооблучателя $F_{\text{ФАР}}$ был выполнен по формуле 1, а эффективность в области фотосинтетически активной радиации (далее – ФАР) $\eta_{\text{ФАР}}$ – по формуле 2 согласно ГОСТ Р 57671-2017.

$$F_{\text{ФАР}} = \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot N_A} \cdot d\lambda = K \cdot \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где $F_{\text{ФАР}}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с; φ_{λ} – спектральная плотность распределения мощности излучения прибора (в области ФАР), Вт/нм; λ – длина волны, нм; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^{17}$ нм/с – скорость света; $N_A = 6,022 \cdot 10^{17}$ мкмоль⁻¹ – число Авогадро; $K = 8,36 \cdot 10^{-3}$ мкмоль · нм⁻¹ · Дж⁻¹ – коэффициент.

$$\eta_{\text{ФАР}} = F_{\text{ФАР}} / P, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{ФАР}}$ – эффективность в области ФАР, (мкмоль/с)/Вт; $F_{\text{ФАР}}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с; P – потребляемая мощность, Вт.

⁶ Software for design and analysis of illumination and optical systems // Lambda Research Corporation. Available at: <https://lambdaresearch.com/tracepro/> (accessed 06.08.2023).

⁷ Научная деятельность института // Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. URL: <https://mrsu.ru/ru/university/institute/ielis/activity/sec/nauchnaya-deyatelnost/> (дата обращения: 02.09.2023).

⁸ ГОСТ Р 55702-2020. Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров : дата введения 2021-03-01. М. : Стандартинформ, 2020. 31 с.

Результаты исследования

В качестве источника излучения был выбран светодиод *Full Spectrum-1* (Китай) на основе технологии *chip on board (COB)* (рис. 1). Спектр светодиода *Full Spectrum-1* соответствует типу *double peak* и содержит две выраженные области (максимума), расположенные в диапазонах длин волн 400–500 нм (синий свет) и 600–700 нм (красный свет).



Р и с. 1. Светодиод *Full Spectrum-1*

Fig. 1. LED *Full Spectrum-1*

В таблице 1 представлены измеренные светотехнические характеристики светодиода *Full Spectrum-1* после 15 минут непрерывной работы. Фотосинтетический поток фотонов светодиода (*PPF*) был определен согласно ГОСТ Р 57671-2017.

Таблица 1
Table 1

Измеренные характеристики светодиода типа *Full Spectrum-1* «double peak»

Measured characteristics of a Full Spectrum-1 “double peak” LED

Параметры / Options	Значения / Meanings
Мощность, Вт / Power, W	7,7
Напряжение, В / Voltage, V	28
Сила тока, мА / Current, mA	274
Энергетический поток излучения, Вт / Energy radiation flux, W	4,62
Оптический КПД, % / Optical efficiency, %	60
<i>PPF</i> , мкмоль/с / <i>PPF</i> , μmol/s	18,48
Фотосинтетическая эффективность, мкмоль/Дж / Photosynthetic efficiency, μmol/J	2,4

Для фитооблучателя был выбран прожекторный корпус из алюминия⁹, позволяющий точно направлять свет на растения, обеспечивая тем самым максимальную эффективность фотосинтеза и роста. Алюминиевый корпус обладает хорошей

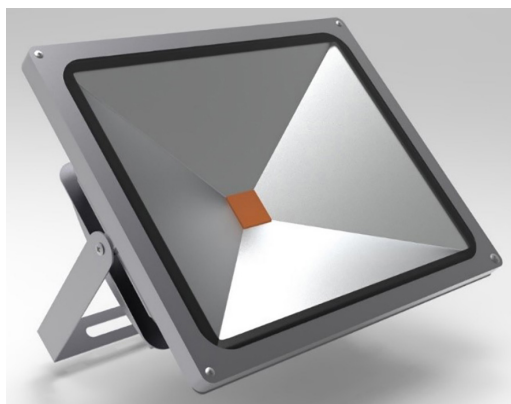
⁹ Корпус светодиодного прожектора мощностью 30 ватт, FLH30 // Светодиодный интернет-магазин ТАУРЭЙ. URL: <https://www.tauray.ru/catalog/flh30.html> (дата обращения: 06.08.2023).

теплопроводностью, что способствует эффективному охлаждению светодиодов и поддержанию их оптимальной рабочей температуры.

Крепление фитооблучателя осуществляется с помощью лиры, которая позволяет надежно установить облучатель и гибко отрегулировать угол направления потока излучения, обеспечивая оптимальное освещение для растений на разных этапах их развития.

С целью защиты светодиодов и отражателя от механических повреждений, пыли, влаги и других неблагоприятных воздействий было использовано защитное стекло толщиной 4 мм и коэффициентом пропускания 0,9.

На рисунке 2 представлена 3D модель светодиодного фитооблучателя, выполненная в системе КОМПАС-3D.



Р и с. 2. 3D модель светодиодного фитооблучателя

F i g. 2. 3D model of LED grow light

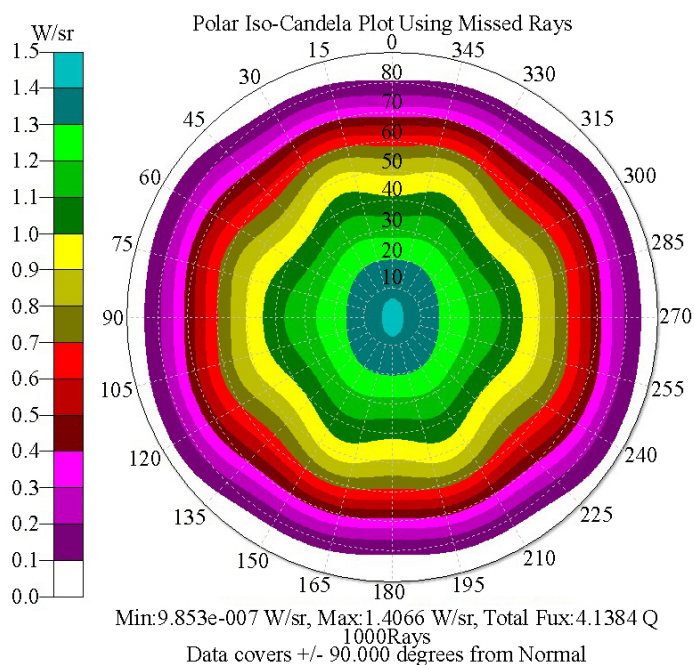
На рисунках 3 и 4 представлены результаты трассировки лучей в программе *TracePro*.

Анализ полученных данных показал, что модель светодиодного фитооблучателя имеет светораспределение близкое к косинусному типу КСС. Энергетический поток излучения составил 4,14 Вт, фотосинтетический поток фотонов – 16,6 мкмоль/с.

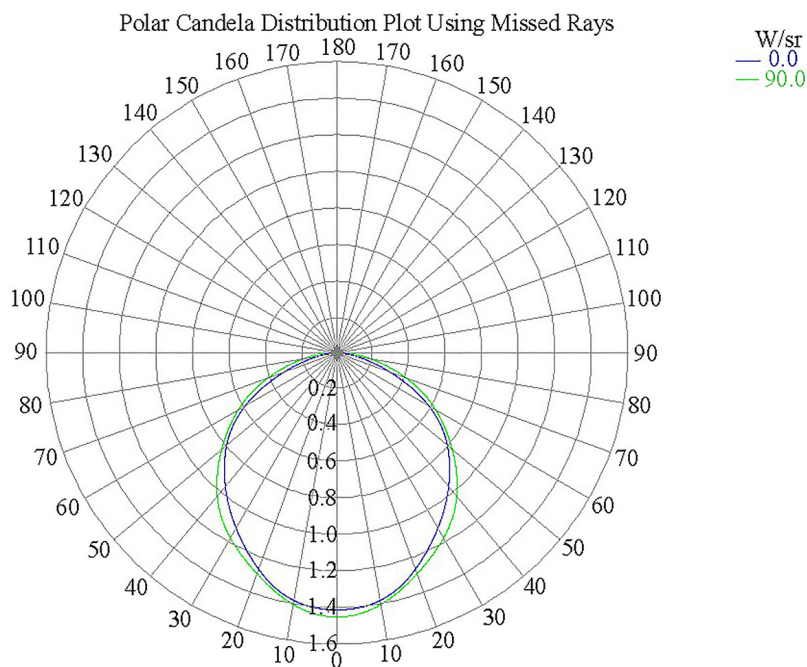
На рисунках 5 и 7 представлены лабораторные испытания прототипа светодиодного фитооблучателя.

Спектральное распределение излучения имеет два максимума, соответствующих 440 нм и 642 нм. При этом интенсивность максимума синего излучения больше максимума красного в 1,25. Такое соотношение способствует вегетативному росту растений и быстрому приросту зеленой массы, а также замедляет процессы цветения [19].

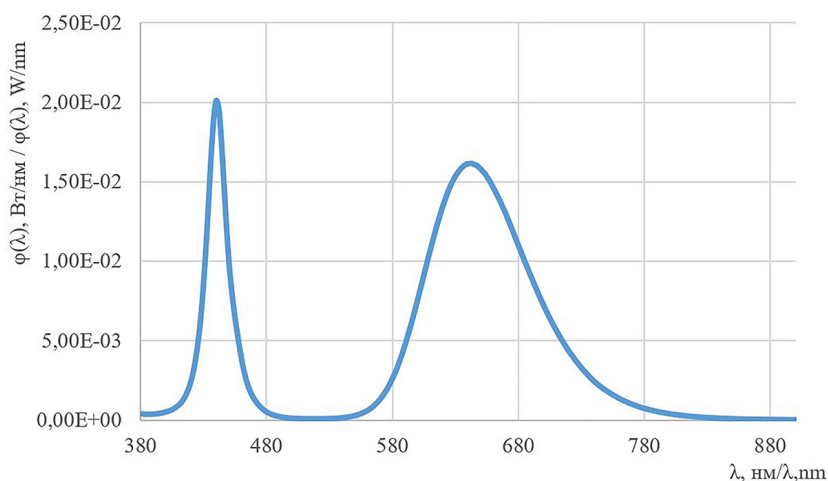
Исследование светораспределения фитооблучателя в пространстве показало, что КСС, измеренная с помощью гониофотометра (рис. 6), близка по форме к КСС, полученной в программе *TracePro* (рис. 4), и соответствует косинусному типу. Двойной угол половинной яркости ($2\Theta_{0,5}$) составил 106,1 град., что позволяет обеспечить равномерное освещение больших площадей. При этом вся энергия излучения фитооблучателя направляется в одну полусферу, что способствует эффективному освещению растений, обеспечивая им необходимую интенсивность света для фотосинтеза и роста.



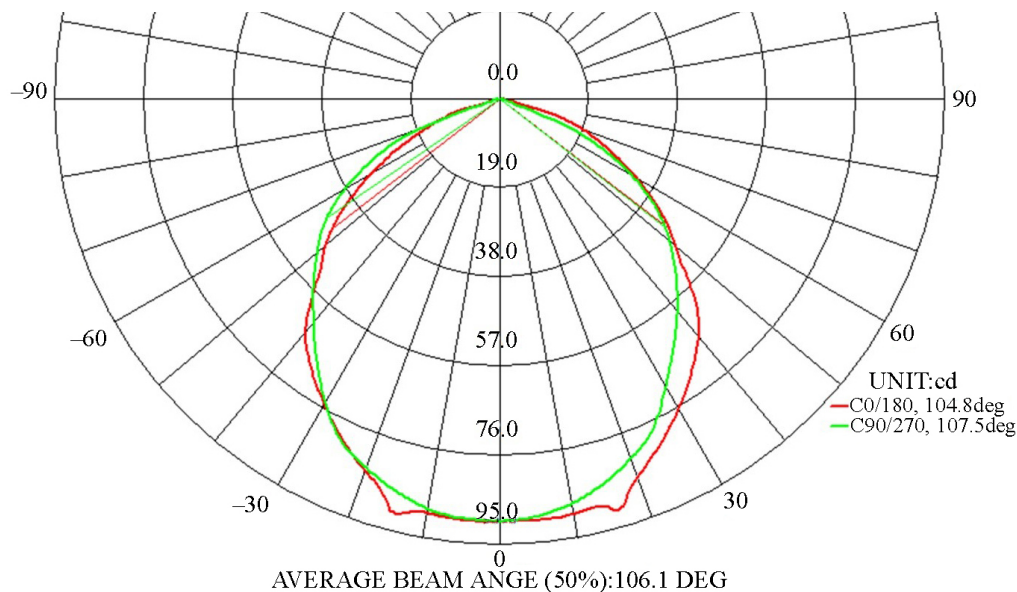
Р и с. 3. Диаграмма светораспределения светодиодного фитооблучателя
F i g. 3. Light distribution diagram of LED grow light



Р и с. 4. Кривые силы света (КСС) светодиодного фитооблучателя
F i g. 4. Luminous intensity curves (LIC) of the LED grow light

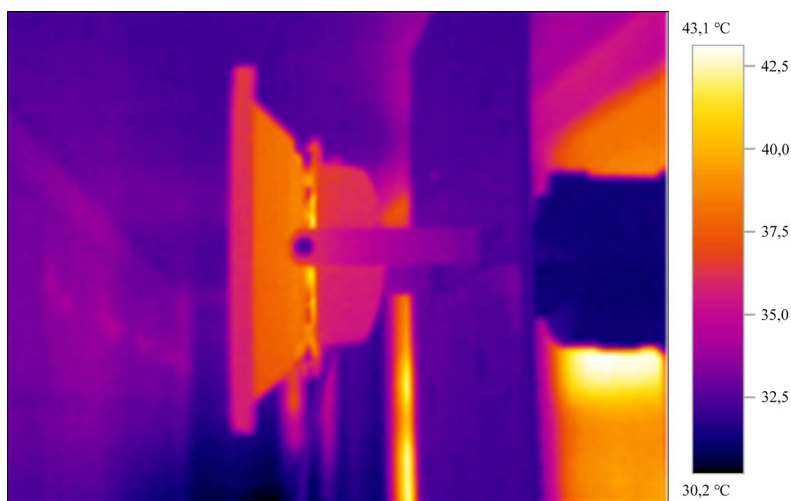


Р и с. 5. Спектральная интенсивность энергетического потока излучения светодиодного фитооблучателя
F i g. 5. Spectral intensity of the energy flux of radiation from the LED grow light



Р и с. 6. КСС светодиодного фитооблучателя
F i g. 6. LIG of the LED grow light

Температура нагрева корпуса светодиодного фитооблучателя (рис. 7) не превышает 41,7 °С, что говорит об эффективном отводе тепла. Максимальный нагрев наблюдается в области крепления *COB* – светодиода к корпусу. Такой отвод тепла важен для обеспечения стабильной и долгосрочной работы светодиодного фитооблучателя. Важно отметить, что превышение максимальной температуры в данной области может привести к перегреву и снижению срока службы светодиодов, а также снижению их эффективности излучения.



Р и с. 7. Термограмма
F i g. 7. Thermogram

В таблице 2 представлены измеренные характеристики разработанного светодиодного фитооблучателя.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Характеристики разработанного светодиодного фитооблучателя
Characteristics of the developed LED grow light

Параметры / Options	Значения / Meanings
Мощность, Вт / Power, W	8,8
Напряжение сети, В / Mains voltage, V	220
Сила тока, мА / Current, mA	87,3
Энергетический поток излучения, Вт / Energy radiation flux, W	4,05
Оптический КПД, % / Optical efficiency, %	46
PPF, мкмоль/с / PPF, $\mu\text{mol/s}$	16,2
Фотосинтетическая эффективность, мкмоль/Дж / Photosynthetic efficiency, $\mu\text{mol/J}$	1,84
Тип КСС / LIG type	Косинусная / Cosine
Способ монтажа / Installation method	Ли́ра / Lyra

Обсуждение и заключение

Разработанный светодиодный фитооблучатель имеет величину фотосинтетического потока фотонов, равную 16,2 мкмоль/с при потребляемой мощности 8,8 Вт. Фотосинтетическая эффективность фитооблучателя составила 1,84 мкмоль/Дж. Этот показатель подтверждает высокую способность фитооблучателя обеспечивать растения необходимой энергией для эффективной фотосинтетической активности. Множество светильников, оснащенных лампами типа ДНаТ, имеют фотосинтетическую эффективность на уровне 1,3 мкмоль/Дж или ниже. Для некоторых из

лучших светильников с лампами этот показатель может достигать 1,7 мкмоль/Дж¹⁰.

Таким образом, описанный фитооблучатель можно использовать для процесса выращивания растений в теплицах, обеспечивая оптимальные условия освещения и способствуя повышению урожайности и качества сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерзлякова В. М., Русских И. Т., Стрелкова Е. И. Определение спектральных характеристик фитосветильников // *Аграрная наука – сельскохозяйственному производству*. 2019. С. 262–268. EDN: [ZBJBXS](#)
2. Чиков В. И. Эволюция представлений о связи фотосинтеза с продуктивностью растений // *Физиология растений*. 2008. Т. 55, № 1. С. 140–154. EDN: [IBWWWJ](#)
3. Кунгс Я. А., Угренинов И. А. Перспективы внедрения светодиодного освещения в теплицах // *Вестник КрасГАУ*. 2015. № 3 (102). С. 53–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-vnedreniya-svetodiodnogo-osvescheniya-v-teplitsah> (дата обращения: 01.08.2023).
4. Katzin D., Marcelis L. F. M., van Mourik S. Energy Savings in Greenhouses by Transition from High-pressure sodium to LED Lighting // *Applied Energy*. 2021. Vol. 281, Issue 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>
5. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting / D. Singh [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 49, Issue 4. P. 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.117>
6. Development of an Ecological Lighting Device to Reduce the growth Time of Agricultural plants in Greenhouses / A. V. Cheremisin [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 1942. 2021. Article no. 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012094>
7. Olle M., Viršile A. The Effects of Light-Emitting Diode Lighting on Greenhouse Plant Growth and Quality // *Agricultural and food science*. 2013. Vol. 22, Issue 2. P. 223–234. <https://doi.org/10.23986/afsci.7897>
8. Ракутько Е. Н., Ракутько С. А., Васькин А. Н. Методика расчета параметров радиационной среды от светодиодного фитооблучателя // *АгроЭкоИнженерия*. 2019. № 1 (98). С. 71–82. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10123>
9. Товстыко Д. А. Изучение роста и развития растений салата под влиянием узкополосных светодиодов // *Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия*. 2020. С. 254–255. EDN [IUPUQG](#)
10. Research into Influence from Different Ranges of Par Radiation on Efficiency and Biochemical Composition of Green Salad Foliage Biomass / L. B. Prikupets [et al.] // *Light & Engineering*. 2018. Vol. 26, Issue 4. P. 38–47. EDN: [YRVHVB](#)
11. Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C. O. Spectral Effects of Artificial light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review // *HortScience*. 2015. Vol. 50, Issue 8. С. 1128–1135. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1128>
12. Светоизлучающее устройство, источник света на основе СИДА (светоизлучающего диода) для растениеводства и промышленное предприятие по выращиванию растений : патент № 2580325 С2 Российской Федерация. № 2013126797/07 ; заявл. 15.11.2011 ; опубл. 10.04.2016.
13. Singh P., Tan C. M. Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the Degradation Process // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6, Issue 1. Article no. 24052. <https://doi.org/10.1038/srep24052>

¹⁰ Поезжалов В. М., Нупирова А. М. Исследование эффективности светодиодного освещения для закрытого грунта // *Материалы LIV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»*. 2015. С. 50. URL: <https://panor.ru/articles/issledovanie-effektivnosti-svetodiodnogo-osveshcheniya-dlya-zakrytogo-grunta/74422.html#> (дата обращения: 01.08.2023).

14. Evaluation of Photobiological Efficiency of Spectrum-Combined LED Phyto-Irradiators in Photo-Culture Cucumber Growing / A. E. Kurshev [et al.]// Light & Engineering. 2022. Vol. 30, Issue 3. P. 93–100. <https://doi.org/10.33383/2022-028>
15. Efficiency of an Alternative LED-based Grow Light System / E. G. Kulikova [et al.]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. Vol. 288, Issue 1. Article no. 012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012064>
16. Эффект от применения светодиодных тепличных облучателей при выращивании культуры огурца в промышленных теплицах / С. И. Олонина [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2020. № 9 (112). С. 31–40. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10082>
17. Байнева И. И., Комаров Н. С. Исследование оптики для светодиодных световых приборов и методов ее компьютерного моделирования // Инженерный журнал с приложением. 2020. № 6. С. 27–31. <https://doi.org/10.14489/hb.2020.06.pp.027-031>
18. Микаева С. А., Железникова О. Е., Сеницына Л. В. Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 33–36. EDN: PUWORL
19. Свешников А. Г., Степанова А. В., Белов В. В. Искусственное освещение теплиц // Студенческая наука – первый шаг в академическую науку. 2018. С. 118–121. EDN: XMVIKT

Поступила в редакцию 22.05.2023; поступила после рецензирования 31.07.2023; принята к публикации 10.08.2023

Об авторах:

Калабкин Александр Андреевич, аспирант 3 курса направления подготовки «Информатика и вычислительная техника» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2975-6449>, sskalabkin@yandex.ru

Кузнецов Евгений Александрович, аспирант 3 курса направления подготовки «Электроника и теплотехника» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>, kuznecov_ea@mail.ru

Ивлиев Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности и сервиса института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6101-3388>, Researcher ID: E-1697-2014, ivliev_sn@mail.ru

Ашрятов Альберт Аббясович, доктор технических наук, доцент кафедры источников света института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-7259>, Researcher ID: D-8971-2014, ashryatov@rambler.ru

Калабкин Вениамин Андреевич, аспирант 2 курса направления подготовки «Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7824-5432>, wkalabkin@yandex.ru

Мусатов Андрей Сергеевич, магистр 2 курса направления подготовки «Электроника и наноэлектроника» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9076-3929>, musatov.andrei181998@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

А. А. Калабкин – анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта и доработка текста, постановка задачи исследования, формирование частных и общих выводов.

Е. А. Кузнецов – разработка трехмерных моделей и сборка конструктивных частей фитооблучателя, осуществление светотехнического расчета, формирование частных и общих выводов, проведение измерений светотехнических параметров фитооблучателя.

С. Н. Ивлиев – научное руководство, формулирование основной концепции исследования.

А. А. Ашратов – проведение измерений светотехнических параметров фитооблучателя.

В. А. Калабкин – разработка трехмерных моделей конструктивных частей фитооблучателя, проведение расчетов и обработка их результатов.

А. С. Мусатов – анализ литературных данных, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Merzlyakova V.M., Russkih I.T., Strelkova E.I. Determination of the Spectral Characteristics of Phyto-lamps. *Agrarian Science for Agricultural Production*. 2019. p. 262–268. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **ZBJBXS**
2. Chikov V.I. Evolution of Ideas About the Relationship Between Photosynthesis and Plant Productivity. *Plant Physiology*. 2008;55(1):140–154. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **IBWWWJ**
3. Kungs Y.A., Ugreninov I.A. Prospects for the Implementation of LED Lighting in Greenhouses. *Bulletin of KrasGAU*. 2015;(3):53–55. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-vne-dreniya-svetodiodnogo-osvescheniya-v-teplitsah> (accessed 01.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Katzin D., Marcelis L.F.M., van Mourik S. Energy Savings in Greenhouses by Transition from High-Pressure Sodium to LED Lighting. *Applied Energy*. 2021;281(1):1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>
5. Singh D., Basu C., Meinhardt-Wollweber M., Roth B. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;49(4):139–147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.117>
6. Cheremisin A.V., Gureeva I.M., Briushinin A.A., Savin D.D., Mozhayko A.A. Development of an Ecological Lighting Device to Reduce the Growth Time of Agricultural Plants in Greenhouses. *Journal of Physics: Conference Series*. 1942. 2021;012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012094>
7. Olle M., Viršile A. The Effects of Light-Emitting Diode Lighting on Greenhouse Plant Growth and Quality. *Agricultural and Food Science*. 2013;22(2):223–234. <https://doi.org/10.23986/afsci.7897>
8. Rakutko E.N., Rakutko S.A., Vaskin A.N. Methodology for Calculating the Parameters of the Radiation Environment From an LED Phytoirradiator. *AgroBioEngineering*. 2019;(1):71–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10123>
9. Tovstyyko D.A. Study of the Growth and Development of Lettuce Plants under the Influence of Narrow-Band LEDs. In: *Safety and Quality of Agricultural Raw Materials and Food: Collection of Articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2020. p. 254–255. (In Russ., abstract in Eng.) EDN **IUPUQG**
10. Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. Research Into Influence From Different Ranges of Par Radiation on Efficiency and Biochemical Composition of Green Salad Foliage Biomass. *Light & Engineering*. 2018;26(4):38–47. EDN **YRVHVB**
11. Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C.O. Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *HortScience*. 2015;50(8):1128–1135. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1128>
12. Light Emitting Device, Light Source Based on LED (Light Emitting Diode) For Plant Growing and Industrial Plant Growing Plant. Patent 2580325 C2 Russian Federation. 2016.
13. Singh P., Tan C.M. Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the Degradation Process. *Scientific Reports*. 2016;6(1):24052. <https://doi.org/10.1038/srep24052>
14. Kurshev A.E., Bogatyrev S.D., Zheleznikova O.E., Gorbunov A.A., Myshonkov A.B., Prytkov S.V., et al. Evaluation of Photobiological Efficiency of Spectrum-Combined Led Phyto-Irradiators in Photo-Culture Cucumber Growing. *Light & Engineering*. 2022;30(3):93–100. <https://doi.org/10.33383/2022-028>
15. Kulikova E.G., Efremova S.Y., Politaeva N., Smyatskaya Y. Efficiency of an Alternative LED-Based Grow Light System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;288(1):012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012064>

16. Olonina S.I., Filatov D.A., Kislyakov V.G., Olonin I.Yu. Effect of Using Led Greenhouse Irradiators When Growing Cucumber Crops in Industrial Greenhouses. *Bulletin of NGIEI*. 2020;(9):31–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10082>
17. Bayneva I.I., Komarov N.S. Study of Optics for LED Luminaires and Methods of Its Computer Modeling. Reference. *Engineering Journal with Application*. 2020;(6):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14489/hb.2020.06.pp.027-031>
18. Mikaeva S.A., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V. Complex of Modern Research Equipment for Light Measurements. *Automation and Modern Technologies*. 2012;(12):33–36. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: PUWORLD
19. Sveshnikov A.G., Stepanova A.V., Belov V.V. Artificial Lighting in Greenhouses. In: Student Science – The First Step into Academic Science. 2018. p. 118–121. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XMVIKT

Submitted 22.05.2023; revised 31.07.2023; accepted 10.08.2023

About the authors:

Alexandr A. Kalabkin, Post Graduate Student of the 3rd year of the direction of training Informatics and Computer Engineering of the National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2975-6449>, sskalabkin@yandex.ru

Evgeniy A. Kuznetsov, Post Graduate Student of the 3rd year of training in Electrical and Thermal Engineering of the National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>, kuznecov_ea@mail.ru

Sergey N. Ivliyev, Cand.Sci (Engr.), Associate Professor of the Chair of Information Security and Service of the Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6101-3388>, Researcher ID: E-1697-2014, ivliyev_sn@mail.ru

Albert A. Ashryatov, Associate Professor of the Chair of Light Sources at the Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-7259>, Researcher ID: D-8971-2014, ashryatov@rambler.ru

Veniamin A. Kalabkin, Post Graduate Student of the 2nd year of the direction of training Private Animal Husbandry, Feeding, Technologies of Feed Preparation and Production of Livestock Products, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7824-5432>, wkabalabkin@yandex.ru

Andrey S. Musatov, Master's Degree Student of the 2nd year in Electronics and Nanoelectronics, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9076-3929>, musatov.andrei181998@yandex.ru

Authors contribution:

A. A. Kalabkin – literature data analysis, preparation of the initial draft and text refinement, research task formulation, formulation of specific and general conclusions.

E. A. Kuznetsov – development of three-dimensional models and assembly of the structural components of the grow light, photometric calculations, formulation of specific and general conclusions, measurement of the photometric parameters of the grow light.

S. N. Ivliyev – scientific supervision, formulation of the main research concept.

A. A. Ashryatov – measurement of the photometric parameters of the grow light.

V. A. Kalabkin – developing three-dimensional models of the grow light structural components, conducting calculations, and processing their results.

A. S. Musatov – literature data analysis, text refinement.

All authors have read and approved the final manuscript.



Power Analysis of Toroidal Core Electromagnetic Energy Harvesters for Transmission Lines

M. S. Balci✉, A. Dalcali

Bandirma Onyedi Eylul University
(Bandirma, Balikesir, Turkey)

✉ mbalci@bandirma.edu.tr

Abstract

Introduction. As the need for energy increases, energy harvesting methods have also been intensively researched. Energy harvesting techniques which are a way of converting low amounts of energy from the environment into electrical energy can be used to meet the energy needs of low-power electronic devices and sensors. The increase in such sensors and devices with low power consumption also makes energy harvesting techniques more important. One of these harvesting techniques is energy harvesting from electromagnetic fields, which is obtained from transmission lines.

Aim of the Article. The article is aimed at developing an effective electromagnetic energy harvester from energy transmission lines for unmanned aerial vehicles.

Materials and Methods. The method of harvesting energy from transmission lines through magnetic field energy harvesting is reviewed. Theoretical analyses, Finite Element Analyses (FEA), and experimental studies are conducted on toroidal core structures designed in different sizes and with different materials.

Results. Among the selected materials and under the specified line conditions, current of 0–30 A and a frequency of 50 Hz, the highest power of 695.516 mW was harvested by the 60x30x20 sized ferrite core harvester at a line current of 30 A.

Discussion and Conclusion. Detailed experiments were conducted based on the 60x30x20 mm ferrite core, which demonstrated the highest induced voltage. Different load resistances were used to find the resistance value for the highest power at each current value. The optimal load resistance for maximum power transmission was determined for each core using the curve fitting method at all current values.

Keywords: energy harvesting, toroid core, transmission line, finite element analysis, electromagnetic harvesters

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

Funding: This work was supported by the Bandirma Onyedi Eylul University Scientific Research Projects Coordination Unit under Project BAP-22-1004-009.

For citation: Balci M.S., Dalcali A. Power Analysis of Toroidal Core Electromagnetic Energy Harvesters for Transmission Lines. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):599–611. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.599-611>



Анализ мощности электромагнитных сборщиков с тороидальным сердечником для линий электропередачи

М. С. Балджи✉, А. Далджали

Университет им. Бандырма Ониеда Эйлюла

(г. Бандырма, Турция)

✉ mbalci@bandirma.edu.tr

Аннотация

Введение. В связи с ростом потребности в энергии интенсивно исследуются и методы ее сбора. Одним из таких методов является сбор энергии от электромагнитных полей, получаемых от линий электропередач. Преобразование малых количеств энергии из окружающей среды в электроэнергию может использоваться для работы маломощных электронных устройств и датчиков.

Цель статьи. Разработать эффективный сборщик электромагнитной энергии от линий электропередач для беспилотных летательных аппаратов.

Материалы и методы. Рассмотрен метод получения энергии от линий электропередач посредством сбора энергии магнитного поля. Теоретический анализ, анализ методом конечных элементов (FEA) и экспериментальные исследования проводились на тороидальных конструкциях сердечника, спроектированных в разных размерах и из разных материалов.

Результаты исследования. Самая высокая мощность 695,516 мВт была собрана сборщиком ферритовых сердечников размером 60х30х20 при линейном токе 30 А, среди выбранных материалов и при заданных условиях сети: токе 0–30 А и частоте 50 Гц.

Обсуждение и заключение. Детальные эксперименты были проведены с ферритовым сердечником 60х30х20 мм, который показал наибольшее напряжение. Были использованы различные сопротивления нагрузки, чтобы найти значение сопротивления для наибольшей мощности при каждом значении тока. Оптимальное сопротивление нагрузки для передачи максимальной мощности определялось для каждого сердечника методом подгонки кривой при всех значениях тока.

Ключевые слова: сбор энергии, тороидальный сердечник, линия передачи, метод конечных элементов, электромагнитные комбайны

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: данное исследование поддержано отделом координации научно-исследовательских проектов ВАР-22-1004-009 Университета им. Бандырма Ониеда Эйлюла.

Для цитирования: Балджи М. С., Далджали А. Анализ мощности электромагнитных сборщиков с тороидальным сердечником для линий электропередачи // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 599–611. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.599-611>

Introduction

An increase in industrial development, driven by technological advancements, as well as the rapid population growth have led to a continuous rise in energy demand. This escalating consumption pattern brings about various challenges on supply security and quality issues in energy. To ensure energy supply security, it may be necessary to diversify energy consumption and increase production levels. However, it is crucial to emphasize that the establishment of power lines alone is insufficient; continuous monitoring, maintenance, and repair are equally critical aspects in guaranteeing the

supply security. A significant number of transmission lines are situated in rural areas, far away from residential zones, making it essential to address certain environmental conditions while monitoring these lines. Factors such as snow and ice accumulation have the potential to affect the distance of lines from the ground and impose substantial loads on supporting poles. Consequently, these situations pose significant challenges and necessitate a meticulous attention to prevent any disruptions [1]. This underscores the vital importance of diligent monitoring and swift intervention to ensure the smooth and uninterrupted functionality of power lines.

In order to monitor the lines, various sensors and equipment are employed to track the parameters such as conductor temperature, inclination angle, and line deflection [2]. Due to the significant difficulty in accessing transmission lines, providing a continuous power supply for these sensors and equipment is a crucial challenge. Therefore, energy harvesting methods can be particularly beneficial, especially for the systems that operate with low-power levels.

Energy harvesting can be defined as the process of obtaining a small amount of electrical energy from various available energy sources in the environment. The energy harvesting process can be accomplished by utilizing diverse resources such as solar, wind, electric fields, and magnetic fields. In monitoring energy transmission lines, electromagnetic energy harvesters can be employed thanks to their several advantages, including their ability to operate as long as there is current in the lines, simplicity of structure, and low maintenance costs [3]. Electromagnetic energy harvesters can possess various geometric shapes of cores, such as toroidal, U-shaped, or triangular. The performance of electromagnetic field energy harvesters is dependent on several variables, such as magnetic material, line current, the number of windings, and core geometry.

In this study, the design, analysis, and experiments of electromagnetic energy harvesters were conducted using toroidal cores of different sizes and magnetic permeabilities for energy transmission lines for unmanned aerial vehicles (UAVs). The designed harvesters were initially analyzed using the Finite Element Method (FEM) and subsequently tested in an experimental setup. Within the scope of the study, the mutual and self-inductance values obtained from each harvester were determined theoretically and through FEM simulations. Additionally, the voltage induced by the harvesters was calculated theoretically and measured in an experimental environment. Furthermore, measurements were taken at different resistance values to determine the maximum power transferred to the load, and the highest power was calculated by curve fitting.

Literature Review

Electromagnetic energy harvesters operate based on the fundamental principles of transformers, deriving energy by inducing voltage from electromagnetic fields referred to as a waste on energy transmission lines. There have been various studies in the literature aimed at enhancing the performance and efficiency of electromagnetic energy harvesters. In a study investigating the influence of core materials, electromagnetic energy harvesters designed using different materials such as ferrite, nanocrystalline, and iron powder were tested with a 5 A line current. The results revealed that the harvester with a nanocrystalline core exhibited the highest power density [4]. However, the data obtained from this single-line current study remains limited. In a similar study, various electromagnetic energy harvesters employing ferrite, nanocrystalline, and iron powder were tested, and the harvester with a ferrite core yielded the highest power at a 15 A line current [5]. When considering these two studies together, it can be observed that a higher power was obtained from the harvester with a ferrite core in one study, while the harvester

with a nanocrystalline core yielded the higher power in the other study. The reason is that although the ferrite core has lower relative permeability than the nanocrystalline core, it is much better than the nanocrystalline core in terms of saturation. Therefore, the selection of magnetic material for an energy harvester design should be based on specific conditions of transmission lines. In another study, the idea of short-circuiting the windings was proposed to prevent core saturation, and a parallel switch was added for this purpose. As a result, the harvested power level was increased by 27% [3]. In a different study testing air-core harvesters of various sizes, a power output of 6.32 mW was achieved at a magnetic flux density of 21.2 μT and a frequency of 60 Hz [6]. In a study focused on the design and testing of harvesters recommended for UAVs to be used for monitoring energy transmission lines, a harvester located 2 cm away from a 10 A and 240 V line achieved an induced voltage with the amplitude of 10 V [7].

Energy harvesting is the process of collecting energy from available sources in the surroundings and converting them into electrical energy. It can be used as an alternative method to meet energy needs of low-power electronic devices and sensors. Particularly in recent years, with an increasing demand for energy and a growing interest in alternative energy sources, energy harvesting methods have been intensively researched. The energy harvesting process can be performed using various sources such as vibration, wind, solar, heat, magnetic field, and electric field, as shown in Figure 1. Each of these sources used in energy harvesting has its own advantages and disadvantages depending on their respective application areas [8].

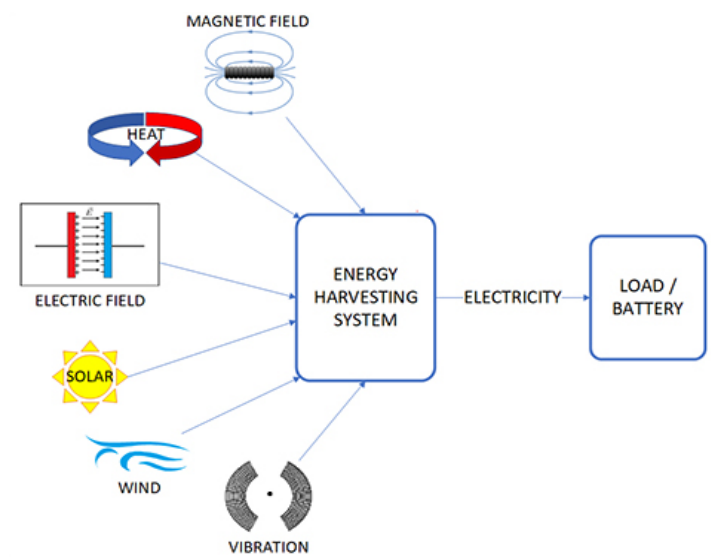


Fig. 1. Energy harvesting systems

Energy harvesting can be achieved through solar energy, which is a renewable energy source. Solar energy has various advantages such as being environmentally friendly, having minimal panel maintenance costs, and being durable [9]. However, the efficiency of these cells varies depending on the type of material [10]. Energy harvesting from solar energy can only be performed under the sunlight. Additionally, even during daytime, the efficiency of energy harvesters significantly decreases if the weather is cloudy.

Another method utilized in energy harvesting is the generation of energy through heat. This method can be employed on any system or device that produces heat, particularly those utilized in industries. There has been a significant increase in the importance of energy harvesting through heat due to the substantial rise in temperature differentials observed in both natural and industrial environments. Thermoelectric generators capable of harvesting energy from heat are advantageous in that they do not possess any moving parts, thus requiring minimal maintenance and exhibiting long lifespans [11]. However, the efficiency of thermoelectric materials is very low and their costs are high [12].

Wind energy has become quite popular in recent years. Wind energy harvesters can be classified into rotating blade harvesters and wind-induced vibration harvesters. Harvesting process of the rotating wind harvesters is done with rotating elements, making the system complex and the maintenance costs high. The wind-induced vibration harvesters, on the other hand, are specifically designed on a structure to allow wind to blow and cause mechanical vibration. The kinetic energy generated by wind is, firstly, converted into vibration energy. Then, the vibration energy is further converted into electrical energy through an electromechanical conversion mechanism [13–15]. The wind energy harvesters, like solar ones, depend on the weather conditions. While these harvesters are efficient in windy conditions, their efficiency decreases when there is no wind.

Vibration-based energy harvesters convert vibrations into electrical energy. Vibration, being easily found in the environment, is one of the most suitable sources for energy harvesting. Particularly, since solar and wind energies are dependent on the weather conditions, vibration energy emerges as an alternative to these sources. However, it can be said that continuous and regular vibrations are necessary for these harvesters to be efficient. There are three different conversion mechanisms, namely piezoelectric, electrostatic, and electromagnetic. Among these mentioned methods, the most common and efficient one is the piezoelectric conversion mechanism thanks to its various advantages, such as its being the simplest one and having a high power density [16; 17].

The technique for electric-field energy harvesting is based on the fundamental principle of circular propagation of an electric field when a specific voltage is applied to a conductor. This emitted energy can be harvested via capacitive displacement current flowing from the conductor to the ground. For this purpose, the current needs to be diverted to flow from a load [18]. The most significant advantage of harvesting energy from electric fields is that it does not require a current flow in the line and provides ease of installation. The disadvantages of these harvesters are their large size and need for short-circuiting in certain cases [19]. The presence of electric fields around power transmission lines under open-circuit conditions, their independence from line currents, and their relatively rich and continuous nature make electric-field energy harvesting one of the suitable techniques for transmission lines.

The process of energy harvesting from solar power is not suitable for monitoring transmission lines at night time or when there is insufficient sunlight due to the continuous requirement for solar irradiation. Similarly, energy harvesting from wind is also unsuitable for transmission lines. Vibration-based energy harvesting systems are not suitable for transmission lines, either, due to the absence of a constant and appropriate vibration source on the lines. Energy harvesting systems utilizing heat energy are not favorable for transmission lines as they necessitate a continuous and available heat source.

Materials and Methods

Electromagnetic energy harvesters enable the extraction of energy from magnetic fields referred to as a waste on energy transmission lines. Electromagnetic energy harvesters are designed in various geometric structures, including toroidal, E-shaped, and

U-shaped configurations. These harvesters can be defined as transformers, where the transmission line acts as a primary winding and the coils on the core serve as a secondary winding. By inducing voltage from the surrounding magnetic field, energy can be obtained from the transmission lines. Figure 2 defines an electromagnetic energy harvesting system with a toroidal core. Compared to other energy harvesting methods, electromagnetic energy harvesters possess several advantages of their being unaffected by adverse weather conditions, the absence of maintenance costs, and the ability to operate as long as there is a current flow in the transmission line.

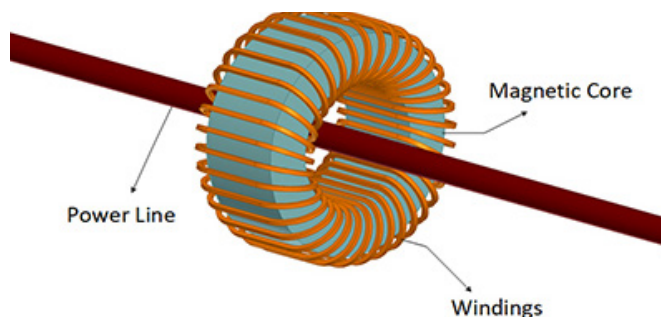


Fig. 2. Toroidal core for electromagnetic energy harvester structure

Toroidal cores have dimensional variables, such as inner diameter, outer diameter, and height, as seen in Figure 3. These variables are of vital importance in terms of the energy obtained by the harvester. Indeed, the amount of harvested energy varies depending on these geometric variables.

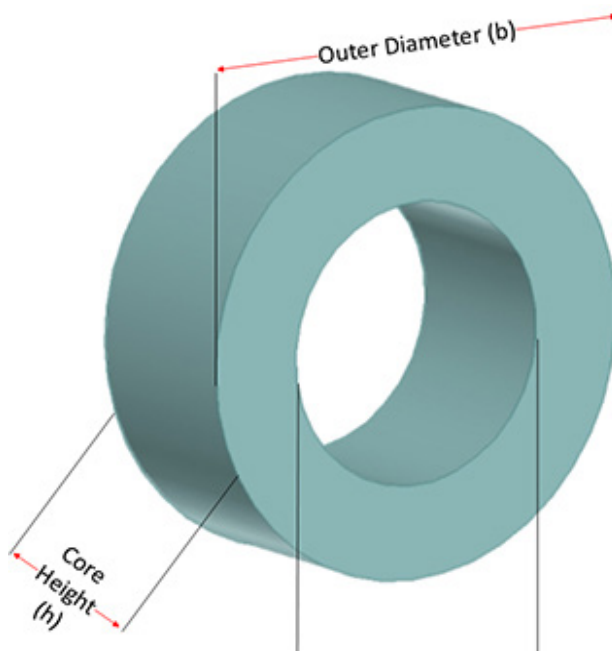


Fig. 3. Toroidal core parameters

Magnetic field energy harvesters operate based on the principles of Faraday's law, Lenz's law, and Ampere's law. Magnetic field strength, represented as (H), is dependent on the applied current, and as the current value increases, the magnetic field strength also increases. For a toroidal core, the magnetic field strength is expressed by Equation 1.

$$\vec{H} = \frac{i}{2\pi r}. \quad (1)$$

Magnetic field strength and magnetic permeability determine magnetic flux density in a core. As a matter of fact, the magnetic flux density is obtained by multiplying magnetic permeability and magnetic field strength. The magnetic permeability is the product of the magnetic permeability of air and the magnetic permeability of a material. The magnetic flux density at any radius r in the toroid core is expressed as in Equation 2.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \frac{i \cos(wt)}{2\pi r}, \\ \phi_{21} &= \int \vec{B}_1 \cdot \vec{ds}_2. \end{aligned} \quad (2)$$

The total magnetic flux in the toroid core is expressed as the area integral of magnetic flux density and shown in Equation 3.

$$\phi_{21} = \frac{\mu i \cos(wt)}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) h. \quad (3)$$

The common inductance of the core is obtained by multiplying the derivative of the total flux with respect to the current and the number of turns, as is seen from Equation 4.

$$\begin{aligned} L_{21} = L_{12} = M &= N_2 \frac{d\phi_{21}}{di}, \\ M &= \frac{\mu}{2\pi} h N_2 \ln\left(\frac{b}{a}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

According to Faraday's law, the voltage induced in a toroid is obtained by multiplying the time derivative of the magnetic flux in the core and the number of turns on the core.

$$\begin{aligned} V_2 &= -N_2 \frac{d\phi_{21}(t)}{dt}, \\ V_2 &= N_2 \mu i f \sin(wt) \ln\left(\frac{b}{a}\right) h. \end{aligned} \quad (5)$$

Thus, the induced voltage of the harvester can be calculated by Equation 5. The highest induced voltage is shown as in Equation 6.

$$V_2 = N_2 \mu i f \ln\left(\frac{b}{a}\right) h. \quad (6)$$

The number of turns in the voltage winding induced through the toroidal core depends on variables, such as magnetic permeability, frequency, line current, and core size. The induced voltage can be obtained along with a mutual inductance, as shown in Equation 7

$$V_2 = M i f \sin(wt) 2\pi. \quad (7)$$

As clearly seen in Equation 7, the voltage induced by the harvester is directly influenced by the mutual inductance value. This emphasizes the significance of mutual inductance in determining the induced voltage. Furthermore, as previously mentioned and observed in Equations 5 and 6, dimensional variables of the core have a significant impact on the harvested energy through the induced voltage. Indeed, the induced voltage increases with a decrease in the inner diameter of the core and an increase in the outer diameter and height.

The analyses of designed harvesters were performed using the Finite Element Method (FEM). The FEM is used to solve problems by partial differential equations and involve the changes in a specific region. The FEM is extensively utilized in various engineering fields, such as electrical-electronic, mechanical, civil, and biomedical engineering to solve problems with the assistance of computers. With the help of FEM, the region to be solved is divided into a finite number of small regions called meshes. By mathematically modeling and solving the effects of these individual meshes, an approximate solution can be obtained. The accuracy of the solution increases as the number of meshes increases. This method allows for the mathematical modeling and simulation of complex structures, enabling the analysis of complex and time-consuming problems to be solved with a high accuracy in a short time [20].

Results

Toroidal-shaped cores were designed and analyzed with different magnetic materials. The dimensions of the cores were selected as mm in terms of outer diameter, inner diameter, and height, respectively, as 50x30x20 and 60x30x20. The magnetic materials used for the cores were nanocrystalline, ferrite, and silicon steel. The designed cores were examined in terms of mutual inductance, self-inductance, and induced voltage. Table 1 presents the analytically calculated inductance values.

Table 1

Common and Self Inductance of the Cores by Analytic Calculations

Core Size Parameters (mm)		60x30x20	50x30x20
CORE MATERIAL	Nanocrystalline	L_{22} (mH)	34.322600
		M (mH)	0.343226
	Ferrite	L_{22} (mH)	58.224363
		M (mH)	0.5822436
	Silicon Steel	L_{22} (mH)	165.0920000
		M (mH)	1.6509200

Table 2 shows the inductance values obtained as a result of FEM analysis. The highest mutual inductance value is 1.637694 mH, and the self-inductance value is 164.4343 mH, achieved with the silicon steel material and a core size of 60x30x20. It can be observed that the analytical and FEM results are very close to each other.

Table 2

Common and Self Inductance of the Cores by FEM Analysis

Core Size Parameters (mm)		60x30x20	50x30x20
CORE MATERIAL	Nanocrystalline	L_{22} (mH)	34.513650
		M (mH)	0.339824
	Ferrite	L_{22} (mH)	58.946370
		M (mH)	0.582920
	Silicon Steel	L_{22} (mH)	164.434300
		M (mH)	1.637694

The toroidal harvesters and experimental setup used in the study can be seen in Figure 4. The number of turns in the toroid was determined based on the winding values in Table 4. A 0.35 mm² copper conductor was selected as the conductor. To increase the line current to the desired value, a transformer with a conversion ratio of 220V:24/12V, 50 Hz, and a 1.5 kVA was used, and a 10 Ohm, 5 A rheostat was used as a pre-resistor to adjust the line current precisely. A clamp ammeter was used to monitor the line current, and multimeters and an oscilloscope were used to measure the induced voltage and the current drawn by the load.

In the experiment, each core was tested within the range of 0–30 A line current with a precision of 5 A, and the induced voltage values were measured. Then, based on the core that induced the highest voltage, power measurements were performed using this core for harvesting. Different resistance values were used as the load to capture the maximum power during these measurements.

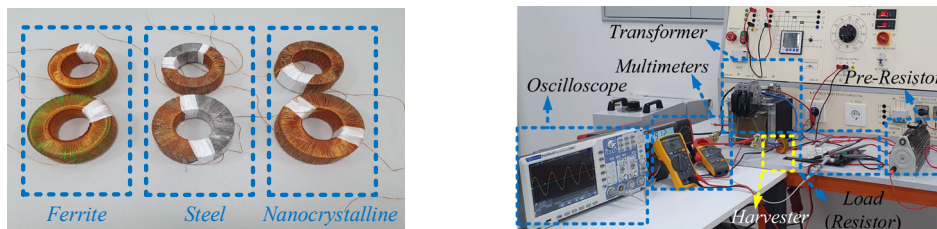


Fig. 4. Experiment setup and harvester cores

In this section, the measured induced voltage and harvested power through the harvesters were provided. To test the designed cores, the inductance value of each core was measured using an LRC meter, and the AL and inductance values were calculated. Based on the calculated AL values, the number of turns for the cores was determined. The experiments were conducted using the calculated number of turns as a reference. Table 3 shows the calculated AL values and the number of turns for the harvesters.

Table 3

AL values and turns of the cores

Core Size Parameters			60x30x20	50x30x20
CORE MATERIAL	Nanocrystalline	AL	6348	23441
		Turn	280	146
	Ferrite	AL	8364.5	6103.17
		Turn	244	286
	Silicon Steel	AL	47091	32375
		Turn	103	124

Figure 5 shows the induced voltage variations in the 50x30x20 mm core according to the line current. The line current was increased in steps of 5 Amperes within the range of 0–30 Amperes, and based on the measurements taken, the highest induced voltage values were obtained by the ferrite core under each current condition.

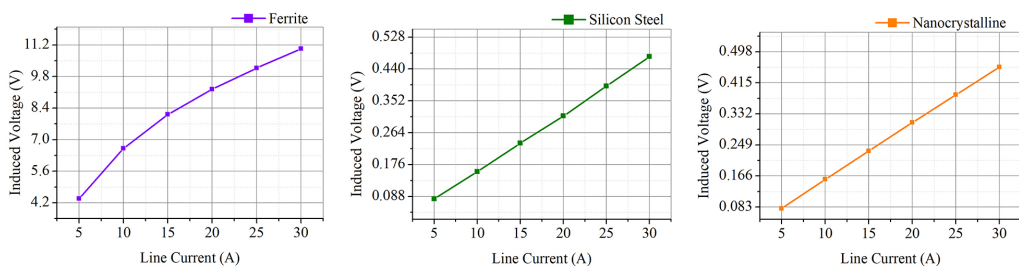


Fig. 5. Induced voltages of 50x30x20 cores

Similarly, the graphs in Figure 6 show the voltage variations induced by 60x30x20 mm cores according to the line current.

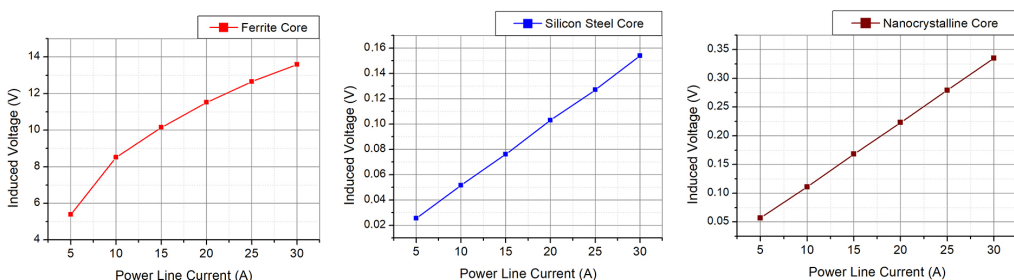


Fig. 6. Induced voltages of 60x30x20 cores

The highest voltage in both dimensions was obtained in the ferrite cores at the determined currents. In the 50x30x20 mm ferrite core, a voltage of 6.61 V was induced at a line current of 10 A, 9.24 V at 20 A, and 11.03 V at 30 A. In the 60x30x20 mm ferrite core, a voltage of 8.51 V was induced at a line current of 10 A, 11.52 V at 20 A, and 13.59 V at 30 A.

In this section of the study, the power values obtained by the harvester were measured. A 60x30x20 mm ferrite core was taken as the basis for power values, where the highest voltage was induced. The power values were determined by changing the load resistance and measuring the power values, and then converted into a graph using curve fitting method. In Figure 7, power variation graphs are observed depending on the load resistance for line current values of 10, 20, and 30 A.

At a line current value of 10 A, the maximum power harvested was 88.943 mW at a load resistance of 66.869 Ω . At 20 A, the maximum power harvested was 343.561 mW at a load resistance of 64.8485 W. Finally, at a line current of 30 A, the maximum power obtained was 695.516 mW at a load resistance of 62.828 W.

The graph of line current, load resistance, and harvested energy for the 60x30x20 mm ferrite core is shown in Figure 8. The graph was optimized through curve fitting for values with a sensitivity of 5 A within the range of 0–30 Amperes. At a line current value of 10 A, the power value increased up to 88.943 mW until 66.869 W, and then started to decrease. When the line current was 20 A, the harvested power increased up to 64.8485 W, reached its maximum, and then started to decrease. The maximum power obtained was 695.516 mW at a line current of 30 A. At 30 A, the harvested power increased up to 62.828 W and then, as seen in the graph, started to decrease.

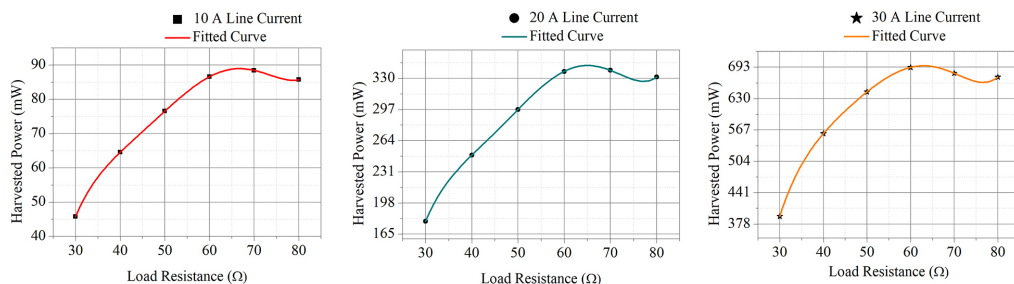


Fig. 7. Harvested power of the core according to load resistance

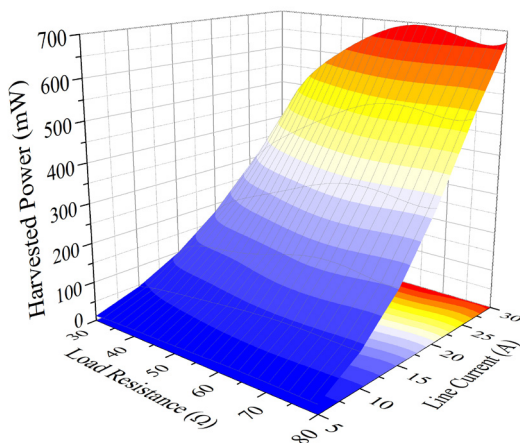


Fig. 8. Harvested power, line current and load resistance

Discussion and Conclusion

In this study, the design of toroidal-shaped magnetic energy harvesters was carried out to harvest energy from power transmission lines. The harvesters were designed in two different sizes, 60x30x20 mm and 50x30x20mm, with three different materials: Ferrite, Nanocrystalline, and Silicon Steel. The theoretical and FEM analyses of the harvesters were performed with a sensitivity of 5 A within the range of 0–30 A. These analyses determined the common-inductance and self-inductance values of the harvesters. At the experimental stage, the AL value of each core was measured using an LCR meter, and the winding turns were determined based on these values. The induced voltages of each core were measured using the experimental setup. Detailed experiments were conducted based on the 60x30x20 mm ferrite core, which exhibited the highest induced voltage. Different load resistances were used to find the resistance value for the highest power at each current value. The optimal load resistance for maximum power transfer was determined for each core using the curve fitting method at all current values. According to the results of the study, among the selected materials and under the specified line conditions of 0–30 A current and 50 Hz frequency, the highest power of 695.516 mW was harvested by the 60x30x20 mm ferrite core harvester at a line current of 30 A. It is believed that this harvested power would be sufficient for the operation of various low-power sensors. Additionally, it is possible to provide energy to batteries using this power.

REFERENCES

1. Moser M.J., Bretterklieber T., Zangl H., Brasseur G. Strong and Weak Electric Field Interfering: Capacitive Icing Detection and Capacitive Energy Harvesting on a 220-kV high-voltage overhead power Line. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58(7):2597–2604. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2098362>
2. Liu Y., Xie X., Hu Y., Qian Y., Sheng G., Jiang X., et al. A Novel High-density power Energy Harvesting Methodology for Transmission Line online Monitoring Devices. *Review of Scientific Instruments*. 2016;87(7):075119. <https://doi.org/10.1063/1.4959556>
3. Zhuang Y., Xu C., Yuan S., He C., Chen A., Lee W.W., et al. An Improved Energy Harvesting System on Power Transmission Lines. In: *2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. 2017. p. 1–3. <https://doi.org/10.1109/WPT.2017.7953847>
4. dos Santos M.P., Vieira D.A., Rodriguez Y.P., de Souza C.P., de Moraes T.O., Freire R.C. Energy Harvesting Using Magnetic Induction Considering Different Core Materials. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2014;942–944. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860881>
5. De Moraes T.O., Malina Y.P., Melo E.C.D.S., De Souza C.P., Experimental Results on Magnetic Cores for Magnetic Induction-Based energy Harvesting. 17th TC-4 Workshop IWADC on ADC and DAC Modeling and Testing. 2013;65. Available at: https://www.researchgate.net/publication/290829983_Experimental_results_on_magnetic_cores_for_magnetic_induction-based_energy_harvesting (accessed 10.06.2023).
6. Tashiro K., Wakiwaka H., Inoue S.I., Uchiyama Y. Energy Harvesting of Magnetic Power-Line Noise. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011;47(10):4441–4444. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2158190>
7. Simic M., Bil C., Vojisavljevic V. Investigation in Wireless Power Transmission for UAV Charging. *Procedia Computer Science*. 2015;60:1846–1855. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.295>
8. Dalcali A., Balci M.S., Sakar, S. Electromagnetic Energy Harvester Design for Power Transmission Line. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*. 2022;14:111–123. <https://doi.org/10.22545/2022/00211>
9. Quyen T., Nguyen C., Le A., Nguyen M. Optimizing Hybrid Energy Harvesting Mechanisms for UAVs. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2020;7(30). <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.164629>
10. Najafi S.A.A., Ali A.A., Sozer Y., De Abreu-Garcia A. Energy Harvesting from Overhead Transmission Line Magnetic fields. In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2018. p. 7075–7082. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8558356>
11. Camboin M.M., Baiocchi O., Villarim A.W.R., Catunda S.Y.C., de Souza C.P., Moreira C.D.S. An Automatic Emulation System for Environmental Thermal Energy Harvesting. In: *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 2019. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2019.8827004>
12. Nadaf N., Preethi A. Review on Waste Heat Energy Harvesting using TEG: Applications and Enhancements. 8th International Conference on Smart Computing and Communications. 2021. p. 334–339. <https://doi.org/10.1109/ICSCC51209.2021.9528196>
13. Yang Y., Zhu G., Zhang H., Chen J., Zhong X., Lin Z. H., et al. Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Wind Energy and as Self-Powered Wind Vector Sensor System. *ACS Nano*. 2013;7(10):9461–9468. <https://doi.org/10.1021/nn4043157>
14. Wu Y., Zhong X., Wang X., Yang Y., Wang Z.L. Hybrid Energy Cell for Simultaneously Harvesting Wind, Solar, and Chemical Energies. *Nano Research*. 2014;7:1631–1639. <https://doi.org/10.1007/s12274-014-0523-y>
15. Wen Q., He X., Lu Z., Streiter R., Otto, T. A Comprehensive Review of Miniatured Wind Energy Harvesters. *Nano Materials Science*. 2021;3(2):170–185. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.04.001>



16. Uddin M.N., Islam M.S., Sampe J., Sawal H., Bhuyan M.S. Design and Simulation of Piezoelectric Cantilever Beam Based on Mechanical Vibration for Energy Harvesting Application. In: International Conference on innovations in Science, Engineering and Technology. 2016. p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICISSET.2016.7856532>
17. Jayarathne W.M., Nimansala W.A.T., Adikary S.U. Development of a Vibration Energy Harvesting Device Using Piezoelectric Sensors. In: Moratuwa Engineering Research Conference. 2018. p. 197–202. <https://doi.org/10.1109/MERCon.2018.8421913>
18. Rodriguez J.C., Holmes D.G., McGrath B.P., Wilkinson R.H. Maximum Energy Harvesting from Medium Voltage Electric-Field Energy Using Power Line Insulators. In: Australasian Universities Power Engineering Conference. 2014. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966633>
19. Moghe R., Yang Y., Lambert F., Divan D. A Scoping Study of Electric and Magnetic Field Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Power System Applications. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2009. p. 3550–3557. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316052>
20. Dalcali A. Influence of Rotor Magnet Material and Stator Winding Geometry on Output Torque in Spherical Actuator. *Journal of Engineering Sciences and Design*. 2019;7(1):145–151. <https://doi.org/10.21923/jesd.437980>

Submitted 10.07.2023; revised 21.08.2023; accepted 28.08.2023

*Поступила в редакцию 10.07.2023; поступила после рецензирования 21.08.2023;
принята к публикации 28.08.2023*

About the authors:

Muhammed Samil Balci, M.Sci. (Engr.), Research Assistant with the Department of Electrical-Electronics Engineering, Bandirma Onyedi Eylul University (Bandirma, Balikesir 10200, Turkey), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3926-253X>, Scopus ID: 57957391100, mbalci@bandirma.edu.tr

Adem Dalcali, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor with the Department of Electrical-Electronics Engineering, Bandirma Onyedi Eylul University (Bandirma, Balikesir 10200, Turkey), National Research University, TIAME (39 Kari Niyazov ko'chasi, Tashkent 100000, Uzbekistan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9940-0471>, Researcher ID: AAI-1055-2021, adalcali@bandirma.edu.tr

Authors contribution:

M. S. Balci – prepared and designed the experiment, conducted experimental research, read and approved the final manuscript.

A. Dalcali – prepared and designed the material of the article, treatment of the experiment results, analyzing, read and approved the final manuscript.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Балджи Мухаммед Самил, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры электротехники и электроники Университета им. Бандырма Онйеды Эйлюла (10200, Турция, Бандырма, Балыкесир), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3926-253X>, Scopus ID: 57957391100, mbalci@bandirma.edu.tr

Далджали Адем, доктор технических наук, доцент кафедры электротехники и электроники Университета им. Бандырма Онйеды Эйлюла (10200, Турция, Бандырма, Балыкесир), Национальный исследовательский университет ТИАМЕ (100000, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Кары Ниязова, д. 39), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9940-0471>, Researcher ID: AAI-1055-2021, adalcali@bandirma.edu.tr

Заявленный вклад авторов:

М. С. Балджи – подготовка и дизайн эксперимента, проведение экспериментальных исследований, утверждение окончательного варианта текста статьи.

А. Далджали – подготовка и оформление материала статьи, обработка результатов эксперимента, анализ, утверждение окончательного варианта текста статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

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. Levtshev – 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 18.12.2023 г. Дата выхода в свет 29.12.2023 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 13,00.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 834. 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 18.12.2023. Date of publishing 29.12.2023.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 13.00.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 100 copies. Order no. 834. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)