

doi: 10.15507/2658-4123.034.202401

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

Том 34, № 1. 2024

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

16+



Vol. 34, no. 1. 2024

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ –
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
им. Н. П. Огарева»

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

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

Подписной индекс – **70539**

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

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

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

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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





Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

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

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Левцев Алексей Павлович – *заместитель главного редактора*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», ORCID: 0000-0003-2429-6777, levtzevap@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 эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ORCID: 0000-0002-1844-5011 (Воронеж, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Тарасов Евгений Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики, 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)

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

EDITORIAL BOARD

Petr V. Senin – *Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Higher School for Development of Scientific and Educational Potential of the National Research Mordovia State University, ORCID: [0000-0003-3400-7780](https://orcid.org/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](https://orcid.org/0000-0003-2429-6777), levtzevap@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

Svetlana V. Gordina – *Executive Editor*, Cand.Sci. (Ped.), ORCID: [0000-0003-2265-418X](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/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](https://orcid.org/0000-0001-8235-0052) (Saransk, Russian Federation)



Oleg N. Kukharev – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Rector of Penza State Agrarian University,
ORCID: [0000-0002-3519-4066](#) (Penza, Russian Federation)

Fedor V. Kusmartsev – Ph.D., Head of the Physics Department, Loughborough University
(Loughborough, Great Britain); Professor of the College of Arts and Sciences, Khalifa University
(Abu Dhabi, UAE)

Yakov P. Lobachevskiy – Dr.Sci. (Engr.), Professor, First Deputy Director, Federal Scientific
Agroengineering Center VIM; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of
RAS, Academician of RAS, ORCID: [0000-0001-7863-2962](#)
(Moscow, Russian Federation)

Svetlana A. Mikayeva – Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electronics,
MIREA – Russian Technological University, ORCID: [0000-0001-6992-455X](#)
(Moscow, Russian Federation)

Andrey Yu. Nesmiyan – Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Deputy Director for Research and
Innovation, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University,
ORCID: [0000-0002-5556-1767](#) (Zernograd, Russian Federation)

Valeriy V. Ostrikov – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Director of the All-Russian Research Institute
for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, ORCID: [0000-0003-2927-768X](#)
(Tambov, Russian Federation)

Sergey A. Plotnikov – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology,
Vyatka State University, ORCID: [0000-0002-8887-4591](#) (Kirov, Russian Federation)

Yuriy N. Prytkov – Dr.Sci. (Agric.), Professor of the Prof. S. A. Lapshin Chair of Zootechnics,
National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

Feliks Ya. Rudik – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov
State Agrarian University, ORCID: [0000-0001-8444-0115](#) (Saratov, Russian Federation)

Polina A. Ryabochkina – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Scientific Officer of the Laboratory of
Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University,
ORCID: [0000-0001-8503-8486](#) (Saransk, Russian Federation)

Abdel-Badeeh M. Salem – Dr.Sci. (CS), Professor Emeritus, Head of Artificial Intelligence and
Knowledge Engineering Research Labs, Professor of the Faculty of Computer and Information Sciences,
Ain Shams University, ORCID: [0000-0003-0268-6539](#) (Cairo, Egypt)

Tamara I. Shishelova – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Physics, Irkutsk National Research
Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

Arkadii A. Simdiankin – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technical Operation of Transport,
Ryazan State Agrotechnological University, ORCID: [0000-0001-9761-6183](#)
(Ryazan, Russian Federation)

Vladimir A. Skryabin – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technology and Equipment in
Mechanical Engineering, Penza State University, ORCID: [0000-0001-7156-9198](#)
(Penza, Russian Federation)

Evgeniy M. Tarasov – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Automatics, Telemechanics
and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University,
ORCID: [0000-0003-2717-7343](#) (Samara, Russian Federation)

Sergey Yu. Zhachkin – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Operation of Transport
and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
ORCID: [0000-0002-1844-5011](#) (Voronezh, Russian Federation)

Olga Ye. Zheleznikova – Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Director of the Institute of Electronics
and Light Engineering, National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Гаджиев П. И., Успенский И. А., Юхин И. А., Рамазанова Г. Г., Гаджиев И. П. Исследование движения клубней картофеля на элеваторе с интенсификатором сепарации	10
Никитин В. В., Ожерельев В. Н. Влияние угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха	26
Чаплыгин М. Е., Степанов К. А. Техничко-экономическая эффективность применения многофункциональных контейнеров в первичном семеноводстве зерновых культур	44

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Гуреев И. И., Нуралин Б. Н., Мухтаров М. У., Костюченкова О. Н. Оптимизация параметров адаптивного распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя	72
Шутенко А. В., Хорт Д. О. Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи	88
Джабборов Н. И., Савельев А. П., Добринов А. В., Захаров А. М., Жуйков И. И. Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы	101
Овчинников В. А., Жалнин Н. А., Комолов А. Д., Зыкин Е. С., Тюрин И. Ю. Повышение равномерности внесения минеральных и известковых удобрений	115

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Неверов Е. Н., Владимиров А. А., Коротких П. С., Николаева Е. В., Порохнов А. Н. Научно-технические основы разработки установки с индукционным нагревом для пастеризации молока	128
---	-----

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Дивин А. Г., Карпов С. В., Захаров Ю. А., Карпова Н. А., Самодуров А. А., Головин Д. Ю., Тюрин А. И. Применение лазерной точечной динамической термографии для контроля качества изделий из композиционных материалов	145
---	-----

Информация для авторов и читателей	164
--	-----



CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Gadzhiev P. I., Uspenskiy I. A., Yukhin I. A., Ramazanova G. G., Gadzhiev I. P. Study of Potato Tuber Motion on the Elevator with Separation Intensifier	10
Nikitin V. V., Ozherelev V. N. Influence of the Grid Inclination Angle on the Efficiency of Preliminary Separation of the Combed Heap	26
Chaplygin M. E., Stepanov K. A. Technical and Economic Efficiency of Using Multifunctional Containers in Primary Seed Production of Grain Crops	44

AGRICULTURAL ENGINEERING

Gureev I. I., Nuralin B. N., Mukhtarov M. U., Kostyuchenkova O. N. Optimization of Parameters of Adaptive Spray System for Agricultural Sprayer	72
Shutenko A. V., Khort D. O. Determination of Water Jet Geometric Parameters Depending on the Type of Nozzle and Jet Operation Mode	88
Jabborov N. I., Savelyev A. P., Dobrinov A. V., Zakharov A. M., Zhuikov I. I. Modeling and Forecasting the Removal of Biogenic Elements from Agricultural Lands Depending on the Soil Agrophysical Properties	101
Ovchinnikov V. A., Zhalnin N. A., Komolov A. D., Zykin E. S., Tyurin I. Yu. Increasing the Uniformity of Application of Mineral and Lime Fertilizers	115

FOOD SYSTEMS

Neverov E. N., Vladimirov A. A., Korotkih P. S., Nikolaeva E. V., Porokhnov A. N. Scientific and Technical Basis for the Development of an Induction Heating Unit for Milk Pasteurization	128
--	-----

INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

Divin A. G., Karpov S. V., Zakharov Yu. A., Karpova N. A., Samodurov A. A., Golovin D. Yu., Tyurin A. I. Using Laser Point Scanning Thermography for Quality Monitoring of Products Made of Composite Materials	145
Information for Authors and Readers of the Journal	164

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 621.928:633.491

doi: 10.15507/2658-4123.034.202401.010-025

Оригинальная статья



Исследование движения клубней картофеля на элеваторе с интенсификатором сепарации

П. И. Гаджиев¹✉, И. А. Успенский², И. А. Юхин²,
Г. Г. Рамазанова¹, И. П. Гаджиев²

¹ Российский государственный университет народного хозяйства имени В. И. Вернадского
(г. Балашиха, Российская Федерация)

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

✉ pgadjiev@yandex.ru

Аннотация

Введение. При уборке картофеля на почвах с повышенной влажностью забиваются зазоры между прутками элеваторов, уменьшается полнота сепарации почвы, увеличивается повреждение клубней картофеля и потеря урожая. Для улучшения качества сепарации в данном исследовании авторы предлагают интенсификатор картофелеуборочного комбайна в виде лопастного транспортера. В отличие от предшественников он расположен под рабочей ветвью полотна основного элеватора.

Цель исследования. Теоретическое обоснование лопастного интенсификатора сепарации картофелеуборочного агрегата на переувлажненных почвах с целью снижения повреждаемости клубней картофеля при уборке.

Материалы и методы. Проанализирована работа интенсификатора сепарации с лопастным транспортером, расположенного под рабочей ветвью основного элеватора картофелеуборочного комбайна с упругими плоскими лопастями, движущимися навстречу полотну основного элеватора. Лопасть интенсификатора, установленного под рабочей ветвью элеватора, должна выполнять функции толкателя при залипании и попадании клубней в зазор между прутками при уборке картофеля на переувлажненных почвах.

Результаты исследования. Анализ движения клубня относительно прутка показал, что при заданных параметрах и условиях шаг лопастей, равный 210 мм, обеспечивает падение шарового комка с прутка и лопасти на ленту транспортера без удара. Во избежание трения с прутками клубней и примесей расстояние между лентой транспортера интенсификатора и прутками должно превышать зазор между прутками. При заданном расстоянии ленты транспортера от прутка, равном 30 мм, шаг лопастей с точностью 1 % определяется скоростью лопасти в движении относительно прутка.

© Гаджиев П. И., Успенский И. А., Юхин И. А., Рамазанова Г. Г., Гаджиев И. П., 2024



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

Обсуждение и заключение. Проведенные теоретические исследования лопастного интенсификатора сепарации картофелеуборочного агрегата на переувлажненных почвах показали его эффективность, что подтверждено результатами полевых опытов.

Ключевые слова: интенсификатор, сепарация почвы, прижимной транспортер, повреждение клубней, картофелеуборочные машины

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование движения клубней картофеля на элеваторе с интенсификатором сепарации / П. И. Гаджиев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 10–25. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.010-025>

Original article

Study of Potato Tuber Motion on the Elevator with a Separation Intensifier

P. I. Gadzhiev^a✉, I. A. Uspenskiy^b, I. A. Yukhin^b,
G. G. Ramazanov^a, I. P. Gadzhiev^b

^a Russian State University of National Economy
named after V. I. Vernadsky (Balashikha, Russian Federation)

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

✉ pgadzhiev@yandex.ru

Abstract

Introduction. When harvesting potatoes from the waterlogged soils, the gaps between the elevator bars become clogged, the soil separation efficiency decreases while damage to potato tubers and yield loss increases. In this study, the authors propose a potato harvester intensifier in the paddle conveyor form to improve the separation quality for specific conditions. It is located under the carrying run of the main elevator apron.

Aim of the Study. The aim of the study is theoretical justification of the potato harvester paddle intensifier for separating potato tubers from waterlogged soils in order to reduce damage to potatoes during harvesting.

Materials and Methods. There was analyzed the work of the separation intensifier with a paddle conveyor located under the carrying side of the potato harvester main elevator with flexible flat blades moving towards the main elevator apron. The intensifier paddle, installed under the elevator carrying side, must act as a pusher when potato tubers stick and fall into the gap between the elevator bars in harvesting potatoes from waterlogged soils.

Results. The analysis of potato tuber motion relative to the bar has showed that under the specified parameters and conditions the pitch of blades equal to 210 mm provides the falling of the ball clod from the bar and blade on the conveyor belt without impact. In order to avoid the friction of potato tubers and impurities with bars, the distance between the intensifier conveyor belt and bars must exceed the gap between bars. When the distance between the conveyor belt and bar is equal to 30 mm, the blade pitch is determined to within 1 per cent by the speed of a blade moving relative to the bar.

Discussion and Conclusion. The conducted theoretical studies of the blade intensifier of potato harvester separation on overwatered soils revealed its high efficiency, which is confirmed by the results of field experiments.

Keywords: intensifier, soil separation, pressure conveyor, potato tuber damage, potato harvesters

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

For citation: Gadzhiev P.I., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Ramazanov G.G., Gadzhiev I.P. Study of Potato Tuber Motion on the Elevator with Separation Intensifier. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):10–25. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.010-025>

Введение

В области современного растениеводства одним из важнейших направлений выращивания сельскохозяйственных культур является картофелеводство. Возделывание картофеля требует значительных энергетических и трудовых затрат. Около 60–70 % всех трудозатрат при производстве картофеля приходится только на уборку клубней.

Особенности развития механизированной уборки картофеля связаны с конструкцией картофелеуборочных машин, так как условия их работы разнообразны и требуют специального подхода к конструкциям. В технологическом процессе уборочных машин важную роль играет сепарация почвы, которая заключается в ее отделении, удалении ботвы, сорняков и твердых почвенных примесей, в том числе камней.

В связи с этим на этапе проектирования картофелеуборочных машин совершенствование сепарирующих рабочих органов всегда является актуальной задачей, особенно когда машины не приспособлены к работе в сложных почвенно-климатических условиях.

Разнообразие почвенно-климатических условий возделывания картофеля подтверждает актуальность вопроса об усовершенствовании сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин, которые будут приспособлены работать повсеместно.

Сложность работы сепарирующих органов заключается в том, что содержание клубней в поступающей на элеватор почвенно-клубненой массе не превышает 2–4 %.

Так, на сепарацию почвы существенное влияние оказывает ее физико-механический состав [1–3]. На переувлажненных почвах прутковые элеваторы не справляются с отделением клубней картофеля от почвы без дополнительной интенсификации поступающей почвенно-клубненой массы [4–6]. На почвах с повышенной влажностью образуются глины, из-за чего при уборке картофеля забиваются зазоры между прутками, уменьшается полнота сепарации, а также увеличивается повреждение клубней, что в конечном итоге приводит к потере большей части урожая [7; 8].

Обзор литературы

Обзор современной научной литературы, а также технологий уборки корнеплодов и картофеля, сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин широко представлен в работах российских и зарубежных ученых. Анализ показывает, что повышение качества сепарации почвы и уровень эксплуатационных и технологических показателей во многом зависят от интенсификаторов, установленных на сепарирующих элеваторах [5]. Разработаны способы и схемы пневматического, гидравлического и механического принципа действия на почвенные комки для крошения почвы [4].

Подтверждено, что эффективность работы сепарирующего устройства напрямую связана с конструкцией и местом расположения самого интенсификатора в комбайне¹. Это характеризуется отсутствием или незначительным содержанием в ворохе несепарируемых почвенных комков и количеством поврежденных клубней.

Характер поступающей на сепарирующие рабочие органы картофелеуборочного комбайна клубненосной массы во многом зависит от почвенно-климатических условий, в частности, от влажности почвы. С повышением скорости картофелеуборочной машины увеличивается толщина клубненосного пласта на сепарирующих рабочих органах [9; 10].

На основании данных проведенного анализа следует отметить, что применяемые современные конструкции интенсификаторов в зависимости от места расположения в комбайне влияют на степень повышения сепарации почвы и снижение повреждения клубней [11].

Например, интенсификаторы, расположенные над рабочим полотном, недостаточно эффективны в случае забивания зазоров между прутками элеватора глыбами и мелкими клубнями.

Для улучшения качества сепарации почвы авторы данной статьи предлагают интенсификатор картофелеуборочного комбайна в виде лопастного транспортера, который, в отличие от предшественников, расположен под рабочей ветвью полотна основного элеватора² [12]. Интенсификатор выполнен в виде транспортера с лопастями, установленными под некоторым углом. Он вращается в сторону, противоположную вращению сепарирующего элеватора картофелеуборочного комбайна, что позволяет защищать зазоры между прутками от залипания [13; 14]. Основная задача лопастного интенсификатора – не допускать залипания между прутками комбайна при уборке картофеля и тем самым уменьшать механические повреждения клубней картофеля и потерю урожая.

Материалы и методы

Вопрос о воздействии лопастного транспортера сепарирующего элеватора на процесс сепарации почвы в картофелеуборочных комбайнах изучен с применением методов теоретической механики.

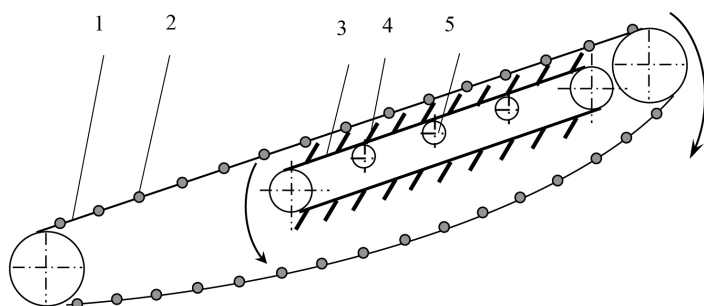
Рассмотрим интенсификатор сепарации с лопастным транспортером, расположенный под рабочей ветвью основного элеватора, с упругими плоскими лопастями, движущимися навстречу полотну основного элеватора (рис. 1). Лопасть интенсификатора, установленного под рабочей ветвью элеватора, должна выполнять функции толкателя при залипании и попадании клубней в зазор между прутками.

¹ Суздалева Г. Ф. Технология сепарации почвенно-картофельного вороха с обоснованием конструктивно-режимных параметров элеватора с комбинированными прутками и интенсификатором : дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2005. 169 с.

² Липатова М. А., Борычев С. Н. Обзор сепарирующих органов картофелеуборочных машин // Материалы Всерос. науч. конф., посвященной 80-летию со дня рождения профессора А. М. Лопатина. 2020. С. 133–138. URL: http://rgatu.ru/archive/sborniki_konf/12-13_11_19/sbor.pdf (дата обращения: 15.02.2023).

Благодаря поддерживающим роликам можно пренебречь прогибом ленты транспортера интенсификатора и поперечным перемещением лопасти-толкателя в направлении, перпендикулярном плоскости ленты, при взаимодействии толкателя с пластом [15–16].

Таким образом, толкатель может взаимодействовать только с такими частями находящихся между соседними прутками клубней, которые выступают за пределы плоскости, касающейся цилиндрических прутков и находящейся под ними.



Р и с. 1. Основной элеватор с интенсификатором сепарации:
1 – полотно основного элеватора; 2 – пруток основного элеватора;
3 – полотно резинового транспортера интенсификатора; 4 – лопасть;
5 – поддерживающий ролик

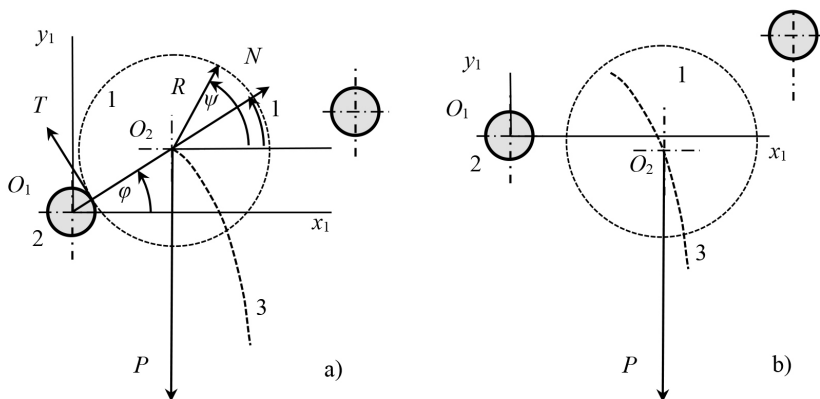
F i g. 1. Main elevator with separation intensifier:
1 – belt of the main elevator; 2 – bar of the main elevator;
3 – intensifier rubber conveyor belt; 4 – paddle;
5 – supporting roller

Выделим две фазы движения клубня в зазоре между прутками:

- 1) движение несвободного клубня при ограничениях, наложенных связью в виде прутка;
- 2) движение свободного клубня после освобождения от связи, то есть без контакта с прутком.

Введем дополнительно следующие обозначения (рис. 2): t – время, с; x_1, y_1 – координаты центра масс O_2 клубня в системе координат $O_1x_1y_1$, м; φ – полярный угол центра масс O_2 клубня в системе координат $O_1x_1y_1$ с отсчетом от оси O_1x_1 и возрастанием в направлении против хода стрелки часов, рад; φ_0 – полярный угол в начальный момент, рад; ψ – угол поворота клубня вокруг оси, проходящей через центр масс клубня параллельно прутку с отсчетом от оси, параллельной оси O_1x_1 , и возрастанием в направлении против хода стрелки часов, рад; ψ_0 – угол поворота клубня в начальный момент, рад; J – момент инерции клубня относительно оси, проходящей через центр масс клубня параллельно прутку, кг; μ – коэффициент трения скольжения клубня по резине прутка и лопасти; m – масса клубня, кг; N – величина нормальной составляющей реакции прутка на клубень, Н; T – сила трения между клубнем и прутком, Н; P – вес клубня, Н; g – ускорение свободного падения клубня, м/с²; D, R – диаметр и радиус клубня со сферической поверхностью, м; d, r – диаметр и радиус цилиндрического прутка, м; h – расстояние

между прутком и лентой резинового транспортера интенсификатора сепарации, м; α – угол наклона рабочей ветви полотна элеватора к горизонтальной плоскости, град; l – шаг лопастей, м; Δt – время падения тела в виде шара с полотна элеватора на ленту транспортера интенсификатора сепарации, с; v_e , v_i – величина скорости соответственно прутка и лопасти при поступательном движении относительно комбайна, м/с.



Р и с. 2. Положение клубня в зазоре между прутками на первой фазе движения относительно прутка (а) и на второй фазе движения (б) с указанием действующих на клубень сил:

1 – клубень; 2 – пруток; 3 – траектория центра масс клубня

Fig. 2. The position of the potato tuber in the gap between the bars in the first phase of motion relative to the bar (a) and in the second phase of motion (b) indicating the forces acting on the potato tuber:

1 – potato tuber; 2 – bar; 3 – trajectory of the center of the potato tuber mass

При составлении уравнений движения клубня относительно прутка на первой фазе необходимо рассматривать два случая: движение клубня без скольжения с прутком (перекатывание по прутку) и движение со скольжением относительно прутка.

Дифференциальные уравнения движения клубня на первой фазе в первом случае запишем как уравнения плоскопараллельного движения тела в инерциальной системе координат $O_1x_1y_1$ в таком виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = N \cos \varphi - T \sin \varphi; \\ m\ddot{y}_1 = N \sin \varphi + T \cos \varphi - P; \\ J\ddot{\varphi} = -TR. \end{cases} \quad (1)$$

Первый вариант имеет место, когда выполняется условие $T < \mu N$. В этом случае к уравнениям (1) следует добавить два аналитических уравнения связи:

$$\begin{cases} x_1 = (R + r) \cos \varphi; \\ y_1 = (R + r) \sin \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

Данные уравнения имеют пять неизвестных функций от времени x_1 , y_1 , φ , N , T . Для их решения необходимо добавить начальные условия: в начальный момент

клубень, вытолкнутый из зазора между прутками, покоится на элеваторе, то есть справедливы равенства:

$$\varphi(t)|_{t=0} = \varphi_0; \dot{\varphi}|_{t=0} = 0; \dot{x}_1|_{t=0} = 0; \dot{y}_1|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

где значение φ_0 , указанное на рисунке 3, имеет вид:

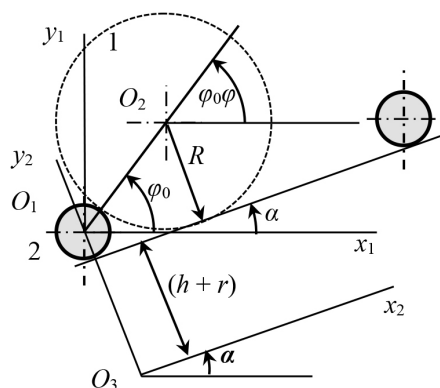
$$\varphi_0 = \arctan \frac{R-r}{R+r}.$$

Подставляя выражения (2) в уравнения (1) и исключая из трех полученных уравнений переменные N и T , придем к одному дифференциальному уравнению:

$$[J + mR(R+r)]\ddot{\varphi} = -PR \cos \varphi;$$

при $J = 2mR^2/5$, $P = mg$:

$$[7R/5 + r]\ddot{\varphi} = -g \cos \varphi. \quad (4)$$



Р и с. 3. Начальное положение клубня в зазоре между прутками на первой фазе движения:

1 – клубень; 2 – прутки

F i g. 3. The initial position of the potato tuber in the gap between the bars in the first phase of motion:

1 – potato tuber; 2 – bar

Решение дифференциального уравнения (4) с начальными условиями (3) можно найти численными методами. При этом

$$N/m = g \sin \varphi - (R+r)\dot{\varphi}^2; T/m = g \cos \varphi / [7/2 + 5r/D] \quad (5).$$

Решение (5) для реактивных сил справедливо в первом случае, когда выполняются неравенства $N/m > 0$, $T/m < \mu N/m$.

Если в какой-то момент $N/m > 0$, $T/m \geq \mu N/m$, то необходимо рассматривать второй случай.

Во втором случае, когда клубень движется по прутку со скольжением, следует принять равенство:

$$T = \mu N.$$

Дифференциальные уравнения движения клубня на первой фазе во втором случае запишем как уравнения плоскопараллельного движения тела в инерциальной системе координат $O_1x_1y_1$ в таком виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = N \cos \varphi - \mu N \sin \varphi; \\ m\ddot{y}_1 = N \sin \varphi + \mu N \cos \varphi - P; \\ J\ddot{\psi} = -\mu NR. \end{cases} \quad (6)$$

К уравнениям (6) следует добавить аналитические уравнения связи (2).

Пять уравнений (6), (2) имеют пять неизвестных функций от времени x_1 , y_1 , φ , N , ψ . Для их решения необходимо добавить начальные условия: в начальный момент с отсчетом времени от 0 положение и скорость центра масс клубня следует принять как решение уравнений (1), (2) в момент начала скольжения, когда $N/m > 0$, $T < \mu N$.

Подставляя выражения (2) в уравнения (6), после исключения из трех полученных уравнений переменной N придем к следующим двум дифференциальным уравнениям:

$$\begin{cases} m(R+r)\ddot{\varphi} = -\mu m(R+r)\dot{\varphi}^2 - P(\cos \varphi - \mu \sin \varphi); \\ J\ddot{\psi} = -\mu [P \sin \varphi - m(R+r)\dot{\varphi}^2]R, \end{cases}$$

а при $J = 2mR^2/5$, $P = mg$:

$$\begin{cases} (R+r)\ddot{\varphi} = -\mu(R+r)\dot{\varphi}^2 - g(\cos \varphi - \mu \sin \varphi); \\ (2R/5)\ddot{\psi} = -\mu [g \sin \varphi - (R+r)\dot{\varphi}^2]. \end{cases} \quad (7)$$

Решение дифференциальных уравнений (7) можно найти численными методами. Начальные условия для переменной ψ совпадают с условиями для переменной φ в момент окончания движения на первой фазе без скольжения относительно прутка, то есть в первом случае. При этом

$$N/m = g \sin \varphi - (R+r)\dot{\varphi}^2. \quad (8)$$

Первая фаза движения заканчивается, когда на этой фазе выполняется неравенство $N/m < 0$. Если неравенство $N/m < 0$ имело место на первой фазе движения в первом случае, то второй случай рассматривать не нужно, то есть первая фаза заканчивается в первом случае.

На второй фазе, начиная с нулевого момента времени, центр масс клубня движется как свободная материальная точка:

$$\begin{cases} x_1 = x_{10} + \dot{x}_{10}t; \\ y_1 = y_{10} + \dot{y}_{10}t - gt^2/2, \end{cases} \quad (9)$$

где x_{10}, y_{10} и $\dot{x}_{10}, \dot{y}_{10}$ – координаты и проекции скорости центра масс клубня по осям O_1x_1 и O_1y_1 в момент окончания первой фазы движения, которые запишем в виде преобразованных формул (2), когда величины $\varphi, \dot{\varphi}$ принимают значения $\varphi_{10}, \dot{\varphi}_{10}$ и $\dot{\varphi}_{10}, \ddot{\varphi}_{10}$ соответственно:

$$\begin{cases} x_{10} = (R + r) \cos \varphi_{10}; \\ y_{10} = (R + r) \sin \varphi_{10}; \\ \dot{x}_{10} = -(R + r) \dot{\varphi}_{10} \sin \varphi_{10}; \\ \dot{y}_{10} = (R + r) \dot{\varphi}_{10} \cos \varphi_{10}. \end{cases}$$

Момент времени, когда клубень соприкоснется с лентой транспортера, определяется из условия:

$$y_1 - x_1 \operatorname{tg} \alpha + (h + r - R) / \cos \alpha \leq 0. \quad (10)$$

За время Δt падения клубня на ленту транспортера лопасть переместится относительно клубня вдоль ленты и полотна транспортера на расстояние l . Учитывая, что скорость лопасти относительно клубня вдоль рабочего полотна элеватора складывается из суммы величин скоростей точек лопасти и прутка элеватора относительно комбайна, запишем выражение для минимального шага l лопастей так:

$$a_1 t_3^2 + b_1 t_3 + c_1 = 0. \quad (11)$$

Вторая фаза движения клубня заканчивается в момент выполнения условия (10). Подставляя выражения (9) координат x_1, y_1 в равенство (10), запишем уравнение для определения времени t_3 движения клубня на второй фазе в таком виде:

$$a_1 t_3^2 + b_1 t_3 + c_1 = 0, \quad (12)$$

где:

$$a_1 = g/2; b_1 = \dot{x}_{10} \operatorname{tg} \alpha - \dot{y}_{10}; c_1 = x_{10} \operatorname{tg} \alpha - y_{10} - (h + r - R) / \cos \alpha.$$

Расчет координат центра шарового мелкого клубня или комка почвы при его движении через зазор между прутками элеватора на первой фазе по дифференциальным уравнениям (4) и (7) и на второй фазе по уравнениям (12) позволяет моделировать движение точки на компьютере и анализировать траектории ее

движения. Анализ уравнений движения позволяет сделать вывод о том, что время падения шара на ленту транспортера из начального положения, при котором шар опирается на прутки и лопасть, при заданном расстоянии от ленты до прутка элеватора и заданном коэффициенте трения комка с прутком не зависит от скоростей точек лопасти и прутка, а зависит только от диаметра шара. Следовательно, в соответствии с формулой (12) шаг l лопастей увеличивается прямо пропорционально увеличению скорости точки лопасти в движении относительно прутка. Поэтому при расчете минимального шага лопасти скорость ее точки относительно прутка следует назначать максимальной из расчетных значений при разных условиях эксплуатации.

Для оценки шага l лопастей интенсификатора сепарации по формуле (11) удобно рассматривать движение центра масс клубня относительно лопасти и ленты транспортера интенсификатора. В связанной с лопастью системе координат $O_3x_2y_2$ уравнения движения центра клубня на обеих фазах запишем так (рис. 2b, рис. 3):

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos \alpha + y_1 \sin \alpha + (v_e + v_i)t; \\ y_2 = -x_1 \sin \alpha + y_1 \cos \alpha + h + r, \end{cases} \quad (13)$$

где x_1, y_1 – координаты движущегося центра клубня в системе координат $O_1x_1y_1$.

Момент времени Δt , когда клубень в виде шара соприкоснется с лентой транспортера, определяется из следующего условия:

$$y_2 - R \leq 0.$$

При этом формула (11) примет такой вид:

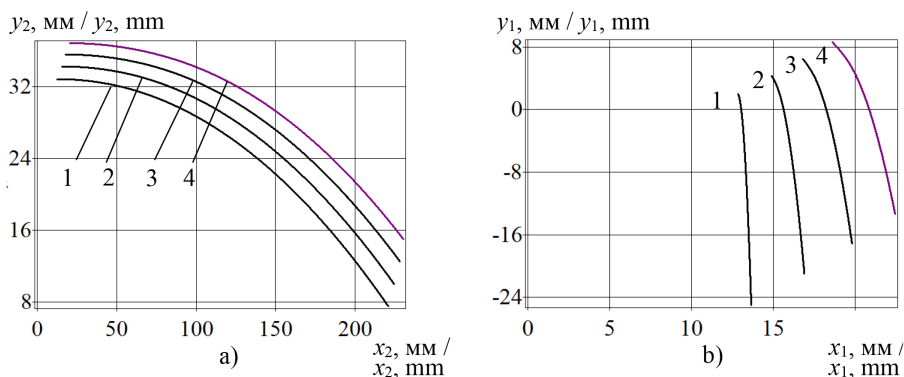
$$l = x_2(\Delta t) - x_2(0).$$

Минимальный шаг l лопастей равен разности абсцисс x_2 концевых точек траектории центра комка при движении его относительно лопасти (рис. 4a).

Результаты исследования

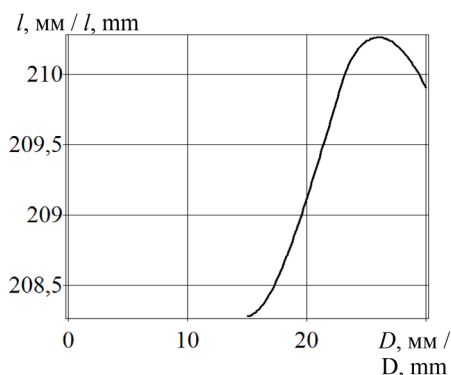
Анализ решения дифференциальных уравнений движения клубня (форма клубня подразумевается в виде шара) относительно прутка показал, что при диаметре клубня 25 мм и 30 мм имеют место оба случая движения на первой фазе. Сначала шар перекачивается по прутку, затем скользит по нему с замедленным вращением и после схода с прутка на второй фазе движется как свободное тело (рис. 4b, 3).

Расчеты показали, что при заданных параметрах и условиях шаг лопастей, равный 210 мм, обеспечивает падение шарового комка с прутка и лопасти на ленту транспортера без столкновения со следующей лопастью (рис. 5).



Р и с. 4. Траектории движения центра шара разного диаметра D через зазор между прутками элеватора и зависимости его координаты y_2 от x_2 при движении относительно лопасти (а) и координаты y_1 от x_1 при движении относительно прутка (б):
1 – $D = 15$ мм; 2 – $D = 20$ мм; 3 – $D = 25$ мм; 4 – $D = 30$ мм

F i g. 4. Trajectories for motion of the center of a ball of different diameters D through the gap between the elevator bars and the dependence of its coordinate y_2 on x_2 when moving relative to the paddle (a) and the coordinate y_1 on x_1 when moving relative to the bar (b):
1 – $D = 15$ мм; 2 – $D = 20$ мм; 3 – $D = 25$ мм; 4 – $D = 30$ мм



Р и с. 5. Расчетная зависимость минимального шага l лопастей от диаметра D шара при скорости лопасти относительно прутка 2,9 м/с

F i g. 5. The estimated dependence of the minimum pitch l of the paddles on the diameter D of the ball at a blade speed relative to the rod of 2.9 m/s

Как можно видеть на графике, представленном на рисунке 5, зависимость шага от диаметра шара, изменение диаметра от 15 мм до 30 мм приводит к увеличению шага на 2 мм, что составляет 1 %. Таким образом, при заданном расстоянии ленты транспортера от прутка, равном 30 мм, шаг лопастей с точностью 1 % определяется скоростью лопасти в движении относительно прутка.

Для подтверждения теоретических исследований были проведены полевые испытания модернизированного картофелеуборочного комбайна КПК-2-01, оснащенного лопастным интенсификатором сепарирующего элеватора.

Результаты некоторых основных сравнительно-полевых исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Агротехнические показатели работы комбайна КПК-2-01
Agrotechnical performance of the combine harvester KPK-2-01

Показатели / Indicators	КПК-2-01 / KPK-2-01	КПК-2-01 с экспериментальным рабочим органом / KPK-2-01 with experimental working body
Скорость комбайна, м/с / Harvester speed, m/s	0,84	0,86
Полнота выкапывания клубней, % / Efficiency of digging potato tubers, %	97,8	98,9
Оставлено на поверхности, % / Left on the surface, %		
в том числе: / including:	—	—
не оторвано от ботвы / not torn off from the tops		
всего потерь / total losses	2,2	1,1
Чистота в таре, %: / Purity in container, %:		
в том числе: / including:		
клубни / potato tubers	88,9	97,8
почва / soil	10,1	1,3
растительные остатки / plant remains	1,0	0,9
Полнота сепарации, % / Separation efficiency, %	85,2	93,5
Повреждения клубней, % / Damage to potato tubers, %	4,5	2,8

Обсуждение и заключение

Исследование показало, что шаг лопастей, равный 210 мм, обеспечивает падение шарового комка с прутка и лопасти на ленту транспортера без удара со следующей лопастью. Изменение диаметра от 15 мм до 30 мм приводит к увеличению шага на 2 мм, что составляет 1 %. Таким образом, при заданном расстоянии ленты транспортера от прутка, равном 30 мм, шаг лопастей с точностью 1 % определяется скоростью лопасти в движении относительно прутка.

На основании таблицы 1 можно сделать следующее заключение. Неповрежденные клубни составляют 97,2 %, поврежденные клубни – 2,8 %. Благодаря установленному транспортеру с лопастным интенсификатором не наблюдалось залипания просвета между прутками. Повреждения клубней уменьшаются на 38 %. Это происходит за счет выталкивания клубней из зазоров между соседними прутками, при случае если клубни закрывают зазоры и транспортирование отсепарированных примесей без заклинивания их между лопастью и прутком. Отсутствие залипания просвета между прутками позволило увеличить рабочую скорость модернизированного комбайна КПК-2-01 с 0,84 м/с на 0,86 м/с.

Таким образом, результаты полевых исследований показали высокую эффективность работы картофелеуборочного комбайна КПК-2-01, оснащенного лопастным интенсификатором. Следовательно, теоретические предпосылки подтвердились.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование комплекса картофелеуборочных и транспортных машин / И. А. Успенский [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 2. С. 27–31. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>
2. Колчин Н. Н., Пономарев А. Г., Петухов С. Н. Как снизить повреждение клубней в машинных технологиях // Картофель и овощи. 2019. № 3. С. 14–16. <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>
3. Design of Small Potato Diggers / N. G. Bayboboev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2022. Vol. 1010, Issue 1. Article no. 012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012080>
4. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна / И. А. Успенский [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 1. С. 262–269. URL: <https://clck.ru/gfacw> (дата обращения: 15.02.2023).
5. Совершенствование отделения картофельных примесей на основе применения поперечного вращающего ворошителя картофелекопателя / А. Н. Бачурин [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 1 (41). С. 99–103. URL: <https://clck.ru/37bBLz> (дата обращения: 15.02.2023).
6. Кузьмин А. В., Вамбуева Э. Б., Болохоев В. С. Проблемы снижения повреждаемости клубней картофеля при уборке // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 4 (31). С. 177–183. URL: <https://clck.ru/37bBXd> (дата обращения: 15.02.2023).
7. Болохоев В. С. Обоснование параметров сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин с целью снижения повреждений клубней // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. 2015. № 1 (38). С. 51–57. URL: <https://clck.ru/37mJZP> (дата обращения: 15.02.2023).
8. Основные задачи и направления НИР по снижению повреждений картофеля и овощей в машинных технологиях их производства / В. Н. Зернов [и др.] // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 4 (25). С. 6–16. EDN: [TANUJF](https://tanujf.ru)
9. Гаджиев П. И., Рамазанова Г. Г., Гаджиев И. П. Условия работы сепарирующего элеватора картофелеуборочных машин на переувлажненных почвах // Наука в центральной России. 2022. № 2 (56). С. 98–106. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-98-106>
10. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology / Z. Wei [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2019. Vol. 12, Issue 5. P. 71–80. URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (дата обращения: 15.02.2023).
11. Сепарирующий рабочий орган картофелеуборочных машин : патент 2785297 Российская Федерация / Гаджиев П. И. [и др.]. № 2021112154/10(025976) ; заявл. 28.04.2021 ; опубл. 06.12.2022, Бюл. № 34. 7 с.
12. Сепарирующий элеватор с очищающими лопастями : патент 214988 Российская Федерация / Гаджиев П. И. [и др.]. № 2022111458/09(024091) ; заявл. 27.04.2022 ; опубл. 23.11.2022, Бюл. № 33. 5 с.
13. Экономическая эффективность комбайновой уборки картофеля с применением интенсификатора сепарирующего элеватора / И. А. Успенский [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2022. Т. 14, № 4. С. 177–184. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.88.19.023>
14. Результаты полевых испытаний картофелеуборочного комбайна КПК-2-01, оснащенного интенсификатором / П. И. Гаджиев [и др.] // Наука в центральной России. 2022. № 6 (60). С. 71–77. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-71-77>
15. Исследование влияния лопастного интенсификатора на полноту сепарации / П. И. Гаджиев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 27–29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-1-27-29>

16. Гаджиев П. И., Гаджиев И. П., Рамазанова Г. Г. Определение конструктивных параметров интенсификатора и условия выталкивания клубня из затора между прутками сепарирующих элементов // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. № 1. С. 35–39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-17-22>

*Поступила в редакцию 24.03.2023; поступила после рецензирования 04.04.2023;
принята к публикации 15.05.2023*

Об авторах:

Гаджиев Парвиз Имранович, доктор технических наук, профессор, декан факультета электроэнергетики и технического сервиса Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: **DNC-7890-2022**, pgadjiev@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, доцент, заведующий кафедрой авто-тракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: **Q-8188-2017**, yuival@rambler.ru

Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры природообустройства и водопользования Российского государственного университета народного хозяйства имени В. И. Вернадского (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: **CPQ-5874-2022**, gulbika@yandex.ru

Гаджиев Имран Парвизович, кандидат технических наук, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9073-5657>, imgadjiev@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

П. И. Гаджиев – научное руководство, постановка задачи исследования.

И. А. Успенский – формулирование основной концепции исследования.

И. А. Юхин – разработка математической зависимости, критический анализ полученных результатов.

Г. Г. Рамазанова – постановка и проведение полнофакторного эксперимента, критический анализ полученных результатов.

И. П. Гаджиев – литературный и патентный анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Machnev A.V., Golikov A.A. Creating an Integrated System of Potato Harvesters and Transport Vehicles. *Technique and Equipment for the Village*. 2021;(2):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31>

2. Kolchin N.N., Ponomarev A.G., Petukhov S.N. How to Reduce Damage to Tubers in Machine Technologies. *Potatoes and Vegetables*. 2019;(3):14–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2019.48.28.002>

3. Bayboboev N.G., Muxamedov J.M., Goyipov U.G., Akbarov Sh.B. Design of Small Potato Diggers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1010(1):012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012080>

Technologies, machinery and equipment

4. Uspenskiy I.A., Rymbalovich G.K., Kostenko M.U., Beznosyuk R.V. Evaluation of a Promising Technological Scheme for a Potato Harvester. *Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2018;(1):262–269. Available at: <https://clck.ru/gfacw> (accessed: 02.15.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Bachurin A.N., Ruzimurovov A.A., Kostenko M.Yu., Lipin V.D., Kalmykov D.V., Golahov A.A. Perfection of the Department of Potato Impurities Based on the Application of the Cross-Rotating Turneter of the Potato. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University*. 2019;(1):99–103. Available at: <https://clck.ru/37bBLz> (accessed: 15.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kuzmin A.V., Vambueva E.B., Bolokhoev V.S. Problems of Potato Tubers Damageability Decrease in the Process of Gathering. *Bulletin of KrasGAU*. 2009;(4):177–183. Available at: <https://clck.ru/37bBXd> (accessed: 15.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Bolokhoev V.S. A Rationale for Parameters of a Potato Harvester Separating Mechanism Aimed at Tuber Damage Reducing. *Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy*. 2015;(1):51–57. Available at: <https://clck.ru/37mJZP> (accessed: 15.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zernov V.N., Petukhov S.N., Aksenov A.G., Siberjev A.V. The Main Objectives and Directions of Research to Reduce Damage to Potatoes and Vegetables in Machine Technologies of Their Production. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2019;(4):6–16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TANUJF
9. Gadzhiev P.I., Ramazanov G.G., Gadzhiev I.P. Separating Elevator Operating Conditions Potato Harvesters on Wet Soils. *Science in Central Russia*. 2022;(2):98–106. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-2-98-106>
10. Wei Z.C., Li H.W., Mao Y.J., Sun C.Z., Li X.Q., Liu W.Z., et al. Experiment and Analysis of Potato-Soil Separation Based on Impact Recording Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019;12(5):71–80. Available at: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4573> (accessed: 02.15.2023).
11. Gadzhiev P.I., Akhmedov I.O., Sorokin A.A., Petrov G.D., Chebotareva I.G. [Separating Working Body of Potato Harvesters]. Patent 2785297 Russian Federation. 2022 December 06. 7 p. (In Russ.)
12. Gadzhiev P.I., Makhmutov M.M., Khismatullina Yu.R., Ramazanov G.G., Shtayunda E.N., Makhmutov M.M., et al. [Separating Working Body of Potato Harvesters]. Patent 2785297 Russian Federation. 2022 December 06. 5 p. (In Russ.)
13. Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Gadzhiev P.I., Ramazanov G.G. Economic Efficiency of Potatoes Combine Harvesting Using the Intensifier of the Separating Elevator. *Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2022;14(4):177–184. <https://doi.org/10.36508/RSA-TU.2022.88.19.023>
14. Gadzhiev P.I., Bashkirov A.P., Ramazanov G.G., Gadzhiev I.P., Shershnev N.S. Field Test Results of a Potato Harvestercombine KPK-2-01 Equipped with an Intensifier. *Science in the Central Russia*. 2022;(6):71–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-71-77>
15. Gadzhiev P.I., Shemyakin A.V., Uspenskiy I.A., Ramazanov G.G., Gadzhiev I.P. Exploring the Influence of a Paddle Intensifier on the Completeness of Separation. *Technique and Equipment for the Village*. 2023;(1):27–29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-1-27-29>
16. Gadzhiev P.I., Gadzhiev I.P., Ramazanov G.G. Determining the Structural Parameters of the Intensifier and Conditions for Pushing Potato Tubers from the Gap between the Rods of Separating Elevators. *Agricultural Engineering*. 2023;25(1):17–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-17-22>

Submitted 24.03.2023; revised 04.04.2023; accepted 15.05.2023

About the authors:

Parviz I. Gadzhiev, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Dean of the Electrical Power Engineering and Technical Service Faculty of the Russian State University of National Economy named after V.I. Vernadsky (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-6126>, Researcher ID: DNC-7890-2022, pgadjiev@yandex.ru



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

Ivan A. Yukhin, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Head of Chair of Machine Park Operation, Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, yuival@rambler.ru

Gulbike G. Ramazanova, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Department of Environmental Engineering and Water Resources Management of the Russian State University of National Economy named after V.I. Vernadsky (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-9479>, Researcher ID: CPQ-5874-2022, gulbike@yandex.ru

Imran P. Gadzhiev, Cand.Sci. (Engr.), Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9073-5657>, imgadjiev@mail.ru

Authors contribution:

P. I. Gadzhiev – scientific guidance, formulation of the research problem.

I. A. Uspensky – formulation of the main concept of the study.

I. A. Yukhin – development of mathematical dependence, critical analysis of the results obtained.

G. G. Ramazanova – setting up and conducting a full-factor experiment, critical analysis of the results.

I. P. Gadzhiev – literary and patent data analysis.


All authors have read and approved the final manuscript.



Влияние угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха

В. В. Никитин, В. Н. Ожерельев 

Брянский государственный аграрный университет
(с. Кокино, Российская Федерация)

 vicoz@bk.ru

Аннотация

Введение. Актуальной научной и практической задачей является обоснование выбора наиболее перспективного варианта устройства для предварительной сепарации очесанного вороха, а также оптимизация его конструкции.

Цель исследования. Оценка влияния угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха.

Материалы и методы. Минимизировать поступление свободного зерна в молотилку можно посредством либо решетчатого днища наклонной камеры, либо горизонтального устройства предбарабанного типа. Для выбора оптимального варианта конструкции сепарирующего устройства был спланирован и проведен лабораторный эксперимент. Исследования проводились в два этапа. В первой серии экспериментов корпус элеватора устанавливали горизонтально, а во второй – под углом 45° к горизонту. Ширина отверстий решетчатого днища имела четыре уровня варьирования (6, 8, 10 и 12 мм), а скорость скребкового транспортера составляла 3 м/с. В качестве объекта исследования был выбран очесанный ворох озимой пшеницы сорта «московская 56». Влажность зерна составляла 12 %.

Результаты исследования. Установлено, что с увеличением ширины отверстий решетчатой поверхности интенсивность сепарации свободного зерна повышается. Максимальная пропускная способность (90 %) устройства соответствует горизонтальному положению решетчатого днища экспериментальной установки и ширине отверстий $b = 12$ мм. Экстраполяция графика убывания свободного зерна свидетельствует о том, что для обеспечения полного выделения свободного зерна длина сепарирующей решетки должна быть не менее $L = 0,9$ м.

Обсуждение и заключение. Использование горизонтальной решетки позволяет повысить сепарирующую способность устройства, а также снизить его металлоемкость на 14–16 %.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, очес растений на корню, свободное зерно, очесанный ворох, сепарирующая решетка

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

© Никитин В. В., Ожерельев В. Н., 2024



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

Для цитирования: Никитин В. В., Ожерельев В. Н. Влияние угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 26–43. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.026-043>

Original article

Influence of the Grid Inclination Angle on the Efficiency of Preliminary Separation of the Combed Heap

V. V. Nikitin, V. N. Ozherelev ✉

Bryansk State Agrarian University
(Kokino, Russian Federation)

✉ vicoz@bk.ru

Abstract

Introduction. A highly topical scientific and practical task is to justify the choice of the most advanced variant of the device for pre-separating the combed heap and to optimize its design.

Aim of the Study. The study is aimed at testing the effect of the grid inclination angle on the effectiveness of pre-separating the combed heap.

Materials and Methods. It is possible to minimize the separated grain flow into the threshing machine either by means of a feeder house grid bottom or by means of a horizontal separating device, located directly in front of the threshing drum. To select the optimal design of the separation device, there was planned and conducted a laboratory experiment. The study was carried out in two stages. In the first series of experiments, the elevator body was installed horizontally, and in the second series – at an angle of 45° to the horizon. The width of the grid bottom openings had four variations (6, 8, 10 and 12 mm), and the speed of the scraper conveyor was 3 m/s. A combed heap of the winter wheat variety Moskovskaya 56 was selected as the study object. The grain moisture was 12%.

Results. According to the results of laboratory studies, it was found that with an increase in the width of the grid surface openings, the intensity of separating grain increases. The maximum device throughput (90%) corresponds to the horizontal position of the grid bottom of the experimental installation and the width of the openings $b = 12$ mm. Extrapolation of the separated grain decreasing graph indicates that to ensure complete separation of grain, the length of the separating grid should be at least $L = 0.9$ m.

Discussion and Conclusion. The use of a horizontal separating grid allows increasing the device separation efficiency and reducing its metal content by 14–16%.

Keywords: combine harvester, combing of standing crops, separated grain, preliminary separation, separating grid

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

Acknowledgements: The authors express their gratitude to anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

For citation: Nikitin V.V., Ozherelev V.N. Influence of the Grid Inclination Angle on the Efficiency of Preliminary Separation of the Combed Heap. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):26–43. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.026-043>

Введение

Одним из важнейших показателей стратегической устойчивости государства является объем производимого зерна¹. Российская зерновая отрасль вместе со всем сельским хозяйством прошла за последние десятилетия большой путь через радикальные институциональные преобразования к полноценному рынку. Далеко не все на этом пути было однозначно позитивным, однако, уже в 2020 г. объем производства зерна превысил в 1,26 раза соответствующий показатель наиболее успешной советской пятилетки (1976–1980 гг.)². Средняя урожайность зерна увеличилась в два раза, что свидетельствует о качественных изменениях в научно-техническом обеспечении отрасли и о значительном повышении ее технологического уровня. В 2022 г. валовой сбор зерна превысил 150 млн т, вследствие чего Россия вышла на его среднедушевое производство на уровне 1 т на человека, что казалось недостижимым еще 30 лет назад.

Одним из главных условий интенсификации зернового производства является его обеспеченность высокоэффективной уборочной техникой. За постсоветский период мы прошли этапы ориентации на имевшийся технический задел, а затем на массовый импорт зерноуборочных комбайнов. При этом удалось в значительной степени сохранить и адаптировать к современным условиям отечественное комбайностроение, которое теперь делит российский рынок с иностранными брендами. Так, в 2019 г. завод «Ростсельмаш» выпустил 78,8 %, а «Брянсксельмаш» – 10,42 % от общероссийского производства комбайнов. В 2022 г. третий по объему выпуска зерноуборочных комбайнов в России завод «Клаас-Восток» в Краснодаре попал под санкции Европейского союза, его дальнейшая перспектива пока не определена³. Значительные проблемы имеют место и с импортозамещением иностранных комплектующих на отечественных предприятиях, которые до 2022 г. были крепко встроены в технологические цепочки с зарубежными партнерами.

Кроме организационно-экономических проблем в комбайностроении есть нерешенные научно-технические аспекты. Стремление максимально увеличить производительность обмолота привело к ее росту у комбайна RSM-161 до 40 т/ч, тогда как у советского предшественника («Дон-1500Б») она составляла только 14 т/ч. Вследствие этого существенно уменьшается необходимое число комбайнов. Вторым следствием является потребность в более высокой урожайности зерновых культур. Так, комбайн LEXION фирмы CLAAS требует для своей оптимальной загрузки урожайность не ниже 70 ц/га. Очевидно, что при средней урожайности российских полей порядка 25–30 ц/га такая высокопроизводительная техника не окупится.

В связи с этим ряд ученых предлагают решать вопрос оптимизации парка зерноуборочной техники путем ее зональной дифференциации и адаптации к местным условиям за счет перехода на семь классов комбайнов с варьированием пропускной способности молотилки в пределах от 3 до 12 кг/с [1–3]. При наиболее низкой урожайности может быть оправданным переход на раздельную уборку с использованием жаток с порционным сбросом хлебной массы [4; 5].

¹ Алтухов И. А., Васютин А. С. Зерно России. М. : ЭКОНДС-К, 2002. 432 с.

² Сельское хозяйство в России. М. : Росстат, 2021. 100 с.

³ Растениеводство [Электронный ресурс]. URL: <https://agrobook.ru/blog/user/olga-shupta/nemeckaya-pressa-zapodozrila-claas-v-narushenii-sankciy-protiv-rossii> (дата обращения: 23.06.2023).

Значительные резервы совершенствования процесса уборки зерна содержит его очес на корню. Поскольку до 70 % энергозатрат в молотилке расходуется на перетирание и разрыв соломы, исключение указанного технологического компонента из процесса в результате использования очеса позволит уменьшить энергоемкость обмолота в 1,4–2 раза⁴ [6; 7]. При стабильном росте цен на энергоносители это существенный способ повышения экономической эффективности производства и уменьшения себестоимости зерна [8–10].

Несмотря на очевидную перспективность очеса на корню его практическое использование по ряду причин сдерживается. Во-первых, нельзя считать завершенным процесс оптимизации конструкции очесывателей и их отдельных элементов, о чем свидетельствуют многочисленные научные публикации последних лет [11–13]. В частности, для уменьшения энергоемкости очеса предлагается использовать поперечные колебания гребенок [14–16]. Во-вторых, очесанный ворох содержит до 80 % свободного зерна, которое поступает в молотильный зазор, где подвергается технологически немотивированному воздействию бичей барабана. В результате резко возрастает степень дробления зерна и потребляется излишне до 10 кВт мощности двигателя⁵.

Радикально решить проблему могла бы предварительная сепарация очесанного вороха до его поступления в молотилку с целью выделения из него свободного зерна и направления последнего непосредственно на очистку, минуя молотильный аппарат. Следует отметить, что синтезировано и испытано несколько вариантов сепарирующих устройств, которые справляются с поставленной задачей [17; 18]. В связи с этим актуальной научной и практической задачей является обоснование выбора наиболее перспективного варианта устройства для предварительной сепарации очесанного вороха, оптимизация его конструкции.

Обзор литературы

Чтобы сделать осознанный выбор оптимального варианта конструкции сепарирующего устройства целесообразно, во-первых, четко установить пределы варьирования основных параметров очесанного вороха. У разных авторов они варьируются в широких пределах. Так, содержание свободного зерна в ворохе может меняться в пределах от 60 до 85 %, оборванных колосьев – от 10 до 25 %, а солоmistых компонентов – от 7 до 25 %⁶. При этом следует помнить, что широкие пределы варьирования параметров вороха могут быть обусловлены как конструктивными особенностями очесывателей, так и разными параметрами их настройки. Увеличение частоты вращения очесывающего барабана способствует росту доли свободного зерна, но наряду с этим возрастает и вероятность дробления продукции⁷. Зависят качественные показатели очеса и от формы гребенок [19]. Положительное влияние на процесс очеса может оказать дополнительное сообщение им поперечных колебаний [14]. Нельзя игнорировать и влияние на результат состояния агрофона.

⁴ Пустыгин М. А. Теория и технологический расчет молотильных устройств. М. : ОГИЗСЕЛХОЗГИЗ, 1948. 96 с.

⁵ Никитин В. В. Совершенствование технологической схемы зерноуборочного комбайна и параметров его рабочих органов : дис. ... д-ра техн. наук. Брянск, 2021. 350 с.

⁶ Там же.

⁷ Савин В. Ю. Обоснование рациональных параметров и режимов работы прицепного очесывающего устройства для уборки зерновых культур : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2011. 22 с.

Так, например, в рамках одного исследования при работе на разных полях содержание в ворохе свободного зерна варьировалось от 69,4 до 82,7 %⁸.

Касательно степени дробления зерна отметим, что при испытании жатки «Славянка УАС» его содержание в бункере комбайна не превысило 2 %, тогда как при использовании жатки ЖОНТУ-6 этот показатель увеличился до 2,63 %⁹. В наших исследованиях доля дробленного зерна в бункере временами приближалась к 5 % [20].

Авторами настоящей статьи было выявлено, что испытания очесывателя с предварительной сепарацией свободного зерна свидетельствуют о доминирующей роли в указанном негативном явлении молотильного барабана [18]. В связи с этим задача дальнейшего исследования сводится к выбору наиболее приемлемого конструктивного решения сепарирующего устройства.

Наиболее многочисленные конструктивные решения предполагают снабжение наклонной камеры решетчатым днищем. При этом различия сводятся к способу подачи выделенного из вороха свободного зерна на очистку. Есть вариант, в котором для этой цели используется дополнительный скребковый транспортер [21; 22]. В качестве альтернативы указанному транспортеру могут служить наклонные шнеки [23–25].

Вторая группа технических решений предполагает размещение вслед за очесывающим барабаном домолачивающего, сквозь решетку подбарабannya которого свободное зерно должно просыпаться вниз и отводиться [26]. Существует несколько аналогичных технических решений, обладающих общими недостатками. Во-первых, домолачивающее устройство, размещенное в наклонной камере, дополнительно воздействует на поток зерна, вызывая его излишнее дробление и способствуя этим нерациональному расходу энергии. Во-вторых, дополнительный вес перегружает передний мост комбайна и ухудшает его управляемость. Кроме того, должна быть существенно усилена конструкция остова молотилки. Негативные побочные явления при такой модернизации комбайна могут превысить по значимости получаемый от нее положительный эффект.

Третья группа технических решений предполагает размещение сепарирующего устройства непосредственно перед молотильным барабаном или вместо него [27; 28]. С точки зрения оптимизации технологического процесса и сложившегося традиционно распределения веса между мостами комбайна такое компоновочное решение предпочтительно. Однако при этом необходимо сдвигать назад молотильный барабан и укорачивать соломотряс из-за радикального уменьшения поступления на него соломистой массы. Таким образом, комбайн должен быть подвергнут радикальной перекомпоновке.

С точки зрения принципа работы укрупненно можно сформировать две альтернативные группы технических решений. В первой сепарация осуществляется на наклонной решетчатой поверхности, а во второй – на горизонтальной или близкой к горизонтальной [29]. Наряду с сопоставлением весовых и компоновочных аспектов

⁸ Червяков И. В. Совершенствование процесса уборки зерновых культур комбайновым очесом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2020. 22 с.

⁹ Жатка трансформируемая очесывающая навесная ЖОНТУ-6 [Электронный ресурс]. URL: https://skmis.ru/test/test_result/2013/test_prijom2013/zernouborochnaya_tekhnika/gatka_gontu_6.html (дата обращения: 23.06.2023).

конкурирующих конструктивных решений целесообразной является оценка влияния на скорость сепарации пространственной ориентации сепарирующей решетки.

Если за ближайший аналог по принципу работы принять бункерные устройства, используемые для накопления и кратковременного хранения зерна, то скорость его истечения из отверстий при разной пространственной ориентации последних существенным образом изменяется. Так, при боковой разгрузке бункера скорость истечения зерна выражается следующей зависимостью:

$$V_{\alpha} = V \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где α – положение выпускающего лотка по отношению к горизонтальной плоскости, град; V – вертикальная составляющая скорости истечения зерна, м/с.

С точки зрения законов гидравлики, скорость истечения сыпучего материала может быть определена следующим образом:

$$V \approx \lambda \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (2)$$

где h – координата высоты столба сыпучего материала, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; λ – коэффициент истечения, варьирующий в пределах 0,2–0,65¹⁰.

Широкие пределы варьирования величины коэффициента λ обусловлены тем, что разные сыпучие материалы не могут быть сопоставимы по своим параметрам, определяющим скорость истечения, главным из которых является угол внутреннего трения φ ¹¹. С этой точки зрения истечение из отверстий чистого зерна не вполне соответствует по характеру и параметрам аналогичному процессу для очесанного зернового вороха, в котором кроме зерна присутствуют легкие примеси и соломистые компоненты. Более того, как было установлено ранее, при истечении мелких компонентов очесанного вороха, перемещаемого скребком транспортера по поверхности решетки, имеют место движение наклонных слоев и качение зерен внутри каждого соскальзывающего слоя [19]. Если же рассматривать скорость истечения мелких компонентов очесанного вороха как среднестатистический показатель, формула (1) свидетельствует о принципиальном преимуществе горизонтальной ориентации решетки, тогда как величину указанного преимущества можно определить только экспериментальным путем, чему и посвящено настоящее исследование.

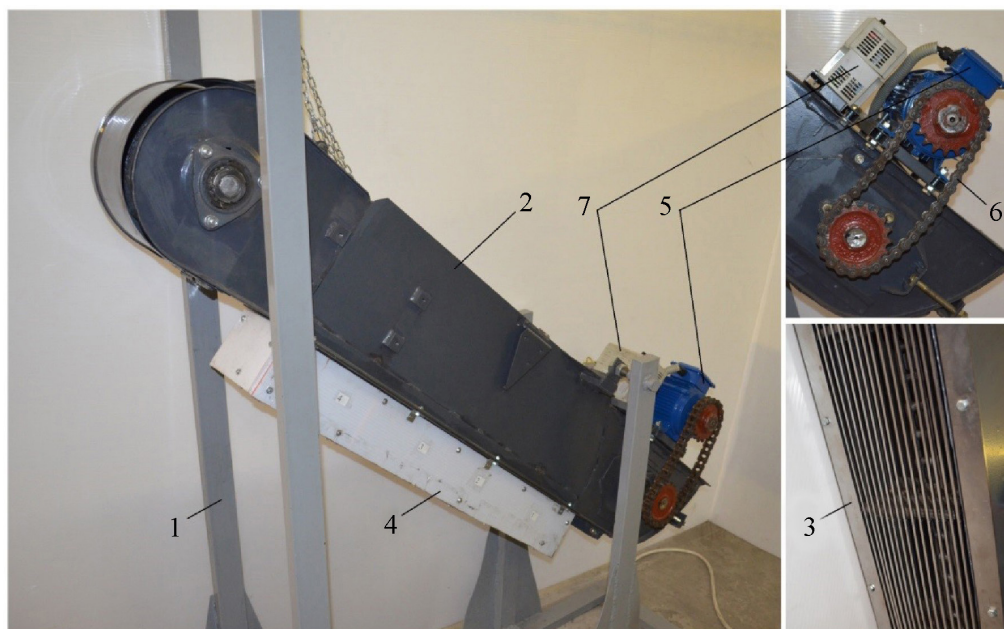
Материалы и методы

Лабораторная установка представляла собой колосовой элеватор зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS12» (рис. 1), смонтированный с возможностью регулировки его положения в горизонтальной плоскости. Для проведения исследований нижняя стенка корпуса элеватора была демонтирована, а вместо нее установлено сменное экспериментальное решето с продолговатыми отверстиями, длина которых составляла 900 мм. Под решетчатым днищем установки была смонтирована емкость для сбора и накопления вороха, прошедшего сквозь отверстия. Скорость скребкового транспортера устанавливалась посредством частотного преобразователя «Веспер» Е2-8300 [17].

¹⁰Зенков Р. Л., Гриневич Г. П., Исаев В. С. Бункерные устройства. М. : Машиностроение, 1977. 225 с.

¹¹Волошин В. Е. Элеваторы и склады: методические указания. Оренбург : ОГУ, 2019. 53 с.

Методика проведения лабораторных экспериментов была следующей. После включения установки внутрь корпуса элеватора подавался очесанный ворох, содержащий 80 % свободного зерна, 10 % оборванных колосков и 10 % соломы [18]. Его подача в пересчете на ширину элеватора соответствовала пропускной способности молотилки серийного комбайна КЗС-1218 и составляла 1 кг/с. После этого учитывалась суммарная масса вороха, прошедшего сквозь отверстия решетки, путем взвешивания и суммирования прохода из четырех секций съемной емкости. При этом фиксировали и массу схода с поверхности решетки. В качестве объекта исследования был выбран очесанный ворох озимой пшеницы сорта «московская 56» [30], отобранный на учебно-опытном поле Брянского государственного аграрного университета. Влажность зерна составляла 12 %.



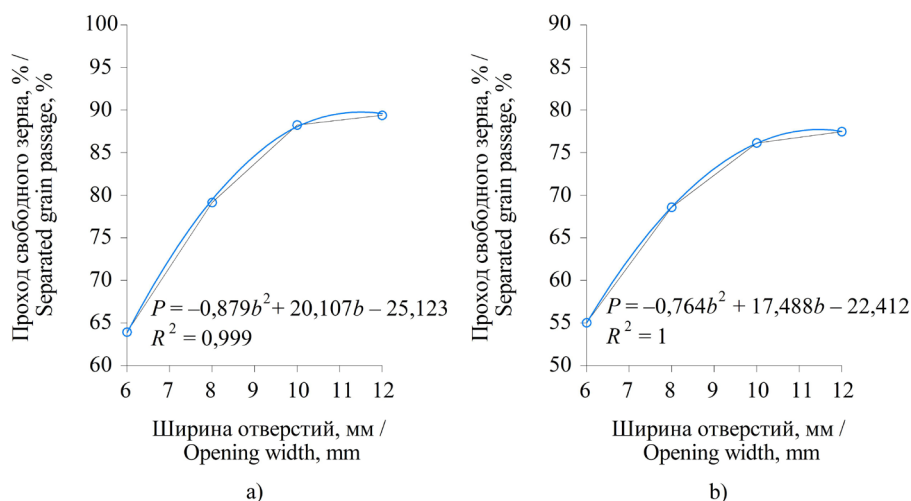
Р и с. 1. Экспериментальная установка: 1 – рама; 2 – корпус элеватора; 3 – сменная решетка; 4 – емкость для сбора и накопления свободного зерна; 5 – электродвигатель; 6 – цепная передача; 7 – преобразователь частотный «Веспер» E2-8300

F i g. 1. Experimental setup: 1 – frame; 2 – elevator body; 3 – replaceable grid; 4 – container for collecting and accumulating separated grain; 5 – electric motor; 6 – chain transmission; 7 – frequency converter Vesper E2-8300

Исследования проводились в два этапа. В первой серии экспериментов корпус элеватора был установлен горизонтально, а во второй – под углом 45° к горизонту. Ширина отверстий решетчатого днища имела четыре уровня варьирования (6, 8, 10 и 12 мм), а скорость скребкового транспортера составляла 3 м/с. При этом выбор интервалов варьирования ширины отверстий решетчатого днища обусловлен необходимостью исключения прохода колосовой части урожая при гарантированной сепарации свободного зерна. Каждый вариант опыта проводился в пятикратной повторности.

Результаты исследования

По результатам лабораторных исследований получена зависимость прохода свободного зерна от ширины отверстий сепарирующей решетки (рис. 2).



Р и с. 2. Влияние ширины отверстий сепарирующей решетки на проход свободного зерна: а) корпус элеватора установлен горизонтально; б) корпус элеватора установлен под углом 45° к горизонту

Fig. 2. The effect of the width of the separating grid openings on the passage of separated grain: a) the elevator body is installed horizontally; b) the elevator body is installed at an angle of 45° to the horizon

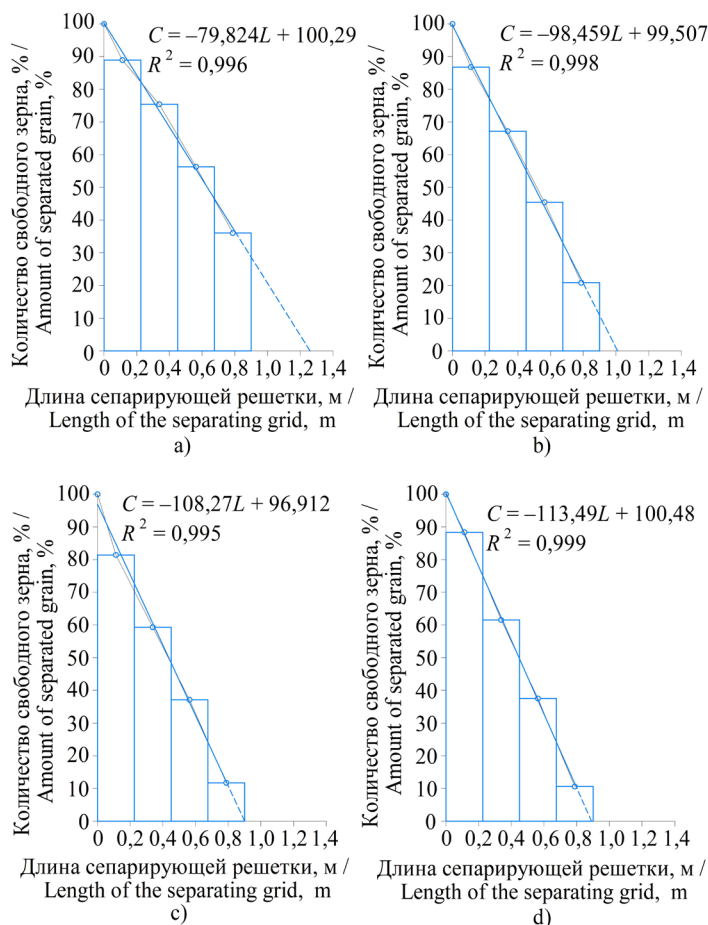
Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением ширины отверстий решетчатой поверхности интенсивность сепарации свободного зерна повышается. Вначале функция резко возрастает, а затем, достигнув некоторой критической величины (ширины отверстий $b = 10$ мм), интенсивность сепарации увеличивается незначительно. Это может быть обусловлено тем, что необмолоченные колосья частично перекрывали отверстия сепарирующей решетки, вследствие чего уменьшалась площадь их «живого сечения». При этом поступление колосовой фракции очесанного вороха во всех вариантах опытов в емкость для сбора и накопления свободного зерна не наблюдалось.

Кроме того, установлено, что в горизонтальном положении сепарирующая решетка обеспечивает проход свободного зерна в интервале 64–90 %, а в наклонном (под углом 45° к горизонту) – 55–78 %. Следовательно, разница между сепарирующей способностью у сравниваемых вариантов пространственной ориентации решетчатого днища составляет порядка 15–16 %. Таким образом, максимальная пропускная способность (90 %) соответствует горизонтальному положению решетчатого днища экспериментальной установки и ширине отверстий $b = 12$ мм.

По результатам лабораторных исследований построены графики убывания свободного зерна по длине сепарирующей решетки (рис. 3, 4). Что касается наличия свободного зерна, сходящего с сепарирующей решетки, то, во-первых, сепарация

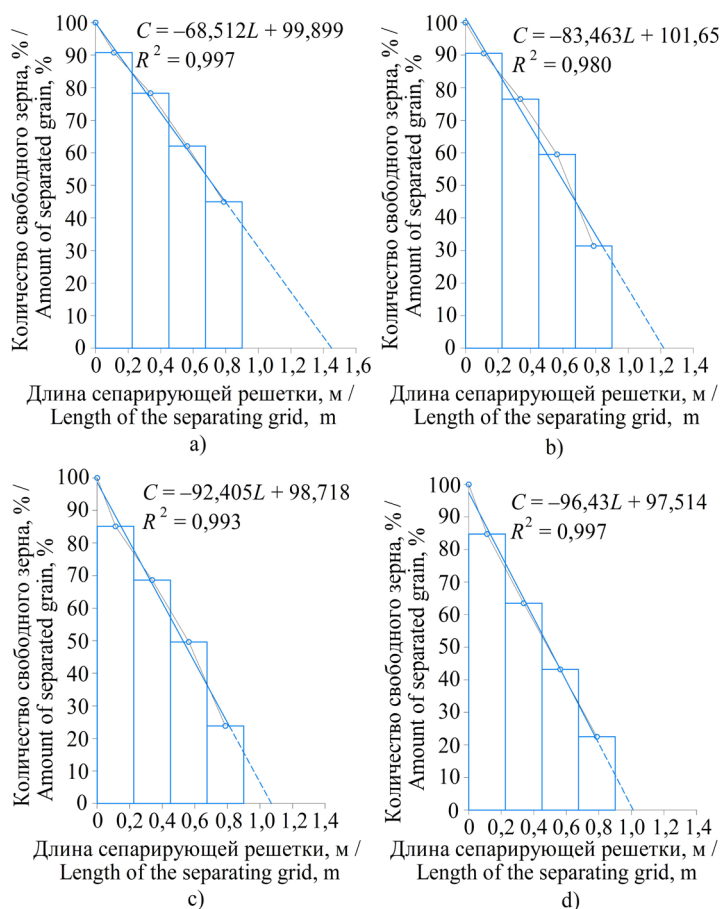
с гарантированным результатом невозможна [31; 32]. Во-вторых, имеется резерв для увеличения степени сепарации. Об этом свидетельствует характер линии тренда, построенного по остатку зерна в ворохе по мере прохождения каждой из четырех емкостей, размещенных под сепарирующей решеткой. Следовательно, для достижения результата, приближающегося к 100 %, следует увеличить длину сепарирующей решетки [33; 34].

Экстраполяция линии тренда (рис. 5) позволила спрогнозировать минимально допустимую длину перфорированной решетки, необходимую для полного выделения свободного зерна в экспериментальной установке.



Р и с. 3. График убывания свободного зерна по длине сепарирующей решетки при горизонтальном расположении элеватора: а) ширина отверстий $b = 6$ мм; б) ширина отверстий $b = 8$ мм; в) ширина отверстий $b = 10$ мм; д) ширина отверстий $b = 12$ мм

F i g. 3. The graph of the decrease of grain along the length of the separating grid with the horizontal location of the elevator body: а) the width of the openings $b = 6$ mm; б) the width of the openings $b = 8$ mm; в) the width of the openings $b = 10$ mm; д) the width of the openings $b = 12$ mm



Р и с. 4. График убывания свободного зерна по длине сепарирующей решетки при расположении корпуса элеватора под углом 45° к горизонту: а) ширина отверстия $b = 6$ мм; б) ширина отверстия $b = 8$ мм; в) ширина отверстия $b = 10$ мм; д) ширина отверстия $b = 12$ мм

Fig. 4. A graph of the decrease in free grain along the length of the separating grid when the elevator body is located at an angle of 45° to the horizon:
 а) the width of the openings $b = 6$ mm; б) the width of the openings $b = 8$ mm;
 в) the width of the openings $b = 10$ mm; д) the width of the openings $b = 12$ mm

По результатам экстраполяции (рис. 5) получена зависимость длины сепарирующей решетки от ширины ее отверстий (рис. 6). Она свидетельствует о том, что с увеличением ширины отверстий длина решетчатой поверхности снижается. При этом длина решетчатого днища в горизонтальном положении должна быть не менее 0,9 м, а в наклонном – 1,01 м.

Следовательно, использование горизонтальной сепарирующей решетки позволяет, в сравнении с ее наклонным положением, снизить металлоемкость устройства на 14–16 %.

Горизонтальное расположение решетки/
Horizontal grid arrangement

$$C_1 := -79.824 \cdot L + 100.29 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 1.256$$

$$C_2 := -98.459 \cdot L + 99.507 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 1.011$$

$$C_3 := -108.27 \cdot L + 96.912 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 0.895$$

$$C_4 := -113.49 \cdot L + 100.48 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 0.885$$

Наклонное расположение решетки/
Inclined grid arrangement

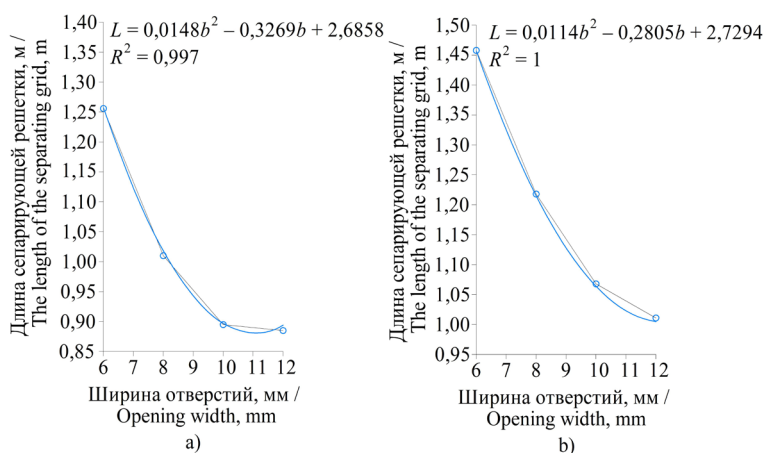
$$C_5 := -68.512 \cdot L + 99.899 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 1.458$$

$$C_6 := -83.463 \cdot L + 101.65 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 1.218$$

$$C_7 := -92.405 \cdot L + 98.718 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 1.068$$

$$C_8 := -96.43 \cdot L + 97.514 = 0 \text{ solve, } L \rightarrow 1.011$$

Р и с. 5. Определение минимально допустимой длины перфорированной решетки в программе Mathcad
F i g. 5. Determination of the minimum allowable length of a perforated grid in the Mathcad program



Р и с. 6. Зависимость длины сепарирующей решетки, необходимой для полной сепарации свободного зерна от ширины ее отверстий: а) корпус элеватора установлен горизонтально; б) корпус элеватора установлен под углом 45° к горизонту

F i g. 6. Dependence of the length of the separating grid for complete separation of grain on the width of its openings: а) the elevator body is installed horizontally; б) the elevator body is installed at an angle of 45° to the horizon

Таким образом, для минимизации металлоемкости конструкции устройства, обеспечивающего предварительное выделение свободного зерна, целесообразно использовать горизонтальную сепарирующую решетку с шириной отверстий $b = 12$ мм.

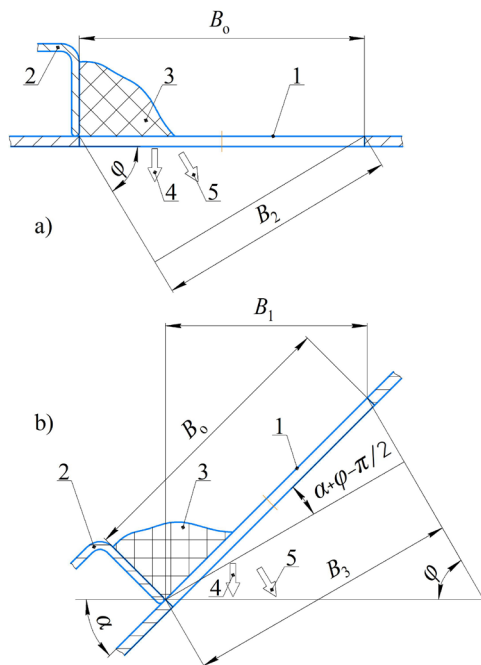
Обсуждение и заключение

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что принятое за аналог боковое истечение зерна из бункера (формула 1) не отражает ситуацию в полной мере в случае сепарации очесанного вороха [35]. При угле наклона выходного отверстия бункера в 45° его пропускная способность должна была бы

уменьшиться на 41 %. В реальности степень уменьшения пропускной способности оказалась на уровне только 15–16 %.

Для объяснения такой значительной разницы в ожидаемом и фактическом результатах была синтезирована новая модель процесса, суммирующая гипотезу об истечении зерна из бункера с полученной ранее гипотезой соскальзывания его наклонных слоев (рис. 7). Объединенная гипотеза предполагает, что часть компонентов просыпаются сквозь отверстия вертикально (по стрелкам 4), из-за чего пропускная способность в этом компоненте зависит от горизонтальной проекции размера выпускного отверстия B_0 . При наклоне решета на угол α ширина пропускного сечения уменьшается до размера $B_1 = B_0 \cdot \cos \alpha$ (рис. 7b).

Вторая часть компонентов очесанного вороха соскальзывает в отверстие под углом естественного откоса φ (по стрелкам 5). Следовательно, правомерно предположить, что пропускная способность отверстия для второй группы компонентов истечения пропорциональна поперечному сечению наклонного зернового потока. При горизонтальном размещении решета поперечный размер отверстия равен B_2 (рис. 7a), а при наклонном решете – B_3 (рис. 7b).



Р и с. 7. Схема истечения очесанного вороха из отверстия решета:

- а) горизонтального; б) наклонного; 1 – отверстие; 2 – скребок транспортера;
3 – очесанный ворох; 4, 5 – доминирующие направления движения вороха

Fig. 7. The diagram of the combed heap outflow from the grid opening: а) horizontal;
b) inclined; 1 – opening; 2 – conveyor scraper; 3 – combed heap;
4, 5 – dominant directions of heap movement

Предложенная гипотеза адекватно описывается следующим эмпирическим уравнением:

$$\mu = a \cdot \frac{1}{\cos \alpha} + b \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos(\alpha + \varphi - \pi/2)}, \quad (3)$$

где a и b – долевое участие компонентов с вертикальным и наклонным проходом сквозь отверстие решета; μ – отношение пропускной способности горизонтального и наклонного решета.

Если принять, что вертикальное и наклонное прохождение компонентов через отверстия равновероятны, то уравнение примет следующий вид:

$$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{\sin \varphi}{\cos(\alpha + \varphi - \pi/2)} \right). \quad (4)$$

Для оценки численного значения соотношения μ примем, что угол φ естественного откоса для очесанного вороха равен 60° . Тогда при угле $\alpha = 45^\circ$ $\mu = 1,152$. Результат, полученный экспериментально, близок к значению исследуемого параметра, вычисленного по эмпирической формуле. При увеличении угла наклона решета до 60° μ увеличивается до 1,5. При уменьшении угла наклона величина μ уменьшается. При $\alpha = 0^\circ$ $\mu = 1$. Так, принятая гипотеза и эмпирическая формула адекватно отражают характер процесса.

На основании приведенного выше анализа можно сделать следующие выводы. Во-первых, максимальный проход свободного зерна через отверстия сепарирующей решетки составляет 90 % при ее горизонтальном положении и ширине отверстий $b = 12$ мм. Во-вторых, экстраполяция линии тренда свидетельствует о том, что для обеспечения полного выделения свободного зерна, содержащегося в очесанном ворохе, длина сепарирующей решетки должна быть не менее $L = 0,9$ м. Для этого необходимо укоротить на соответствующую величину длину соломотряса и сместить назад молотильный барабан, освободив место для монтажа сепарирующего устройства. В-третьих, использование горизонтальной сепарирующей решетки позволяет снизить металлоемкость устройства на 14–16 % (в сравнении с ее наклонным положением). Подводя итоги, также хочется отметить, что дальнейшие исследования целесообразно провести на других зерновых культурах при варьировании влажности очесанного зернового вороха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пьянов В. С. Организация работы автотранспорта в условиях крупнотоварного производства зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 7. С. 50–51. EDN: [OWWLYL](#)
2. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan / V. L. As-tafyev [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 3. P. 46–51. URL: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (дата обращения: 23.06.2023).



3. New Working Element of Stripper Header “OZON” / N. V. Aldoshin [et al.] // INMATEH – Agricultural Engineering. 2018. Vol. 55, Issue 2. P. 71–76. URL: <https://clck.ru/38ULes> (дата обращения: 23.06.2023).
4. On the Substantiation of the Technological Scheme of the Combine Harvester with the Stationary Process of Threshing Bread Mass / A. S. Ovchinnikov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 488, Issue 1. Article no. 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012057>
5. Загрузка комбайнов, требования к хлебным валкам и воздействие уборочной техники на агроландшафты как предпосылки разработки и применения порционной технологии уборки / И. Н. Глушков [и др.] // Известия Международной академии аграрного образования. 2021. № 57. С. 36–41. EDN: [DHHJUQ](https://www.edn.ru/10.1088/1755-1315/488/1/012057)
6. Lovchikov A. P., Ognev I. I. Theoretical Background for the Development of Stationary Process of Grain Mass Threshing with a Combine Harvester // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. 2020. Vol. 193. Article no. 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019301004>
7. Increase in Soil Moisture Reserves Due to the Formation of High Stubble Residues for the Accumulation of Snow Precipitation / M. Konstantinov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666, Issue 5. Article no. 052049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>
8. Buryanov A. I., Chervyakov I. V. Using Combines for Cleaning Grain Crops by Non-Traditional Technologies // INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 27–32. URL: <https://clck.ru/38UPX4> (дата обращения: 23.06.2023).
9. Савин В. Ю. Зависимость степени дробления зерна пшеницы от частоты вращения очесывающего устройства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3. С. 98–102. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>
10. Development of a Method to Control Threshing Process Based on Properties of Harvested Crop Variety and External Factors / A. V. Alabushev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 422, Issue 3. Article no. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012005>
11. Adaptation of Threshing Devices to Physical and Mechanical Characteristics of Harvested Crops / Yu. F. Lachuga [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2020. Vol. 46, Issue 2. P. 198–201. <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
12. Chaplygin M. E., Tronev S. V., Davydova S. A. Soybean Harvesting Using Current Dedicated Headers and Adapters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659, Issue 1. Article no. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012014>
13. Chaplygin M. E., Pekhalskiy I. A., Tronev S. V. The Choice of Combine Harvesters and Their Adapters for the Conditions of Northern Kazakhstan // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 3. P. 74–76. EDN: [AHZGML](https://www.edn.ru/10.1088/1755-1315/659/1/012014)
14. Савин В. Ю. Исследование очесывающего аппарата устройства для уборки зерновых культур как колебательной системы // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31. № 3. С. 403–413. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.403-413>
15. Очесывающий аппарат : патент 2726110 Российская Федерация / Савин В. Ю. № 2019117319 ; заявл. 04.06.2019 ; опубл. 09.07.2020, Бюл. № 19. 4 с.
16. Очесывающий аппарат : патент 2751846 Российская Федерация / Савин В. Ю. № 2020128369 ; заявл. 25.08.2020 ; опубл. 19.07.2021, Бюл. № 20. 4 с.
17. Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 190–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>
18. Исследование параметров очесанного зернового вороха / В. Н. Ожерельев [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 1. С. 7–9. EDN: [TZNNGD](https://www.edn.ru/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206)
19. Съемная гребенка очесывающего оборудования : патент 2646054 Российская Федерация / Кухарев О. Н., Семов И. Н., Федин М. А. № 2017111437 ; заявл. 04.04.2017 ; опубл. 01.03.2018. 11 с.
20. Очес растений на корню с предварительной сепарацией свободного зерна / В. Н. Ожерельев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 1. С. 73–79. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>

21. Наклонная камера зерноуборочного комбайна : патент 1687078 СССР / Дементьев А. В., Скорик В. И., Пастухов Б. К. [и др.]. № 4689013/15 ; заявл. 12.05.1989 ; опубл. 30.10.1991, Бюл. № 40. 5 с.
22. Наклонная камера зерноуборочного комбайна : патент 2577892 Российская Федерация / Ожерельев В. Н., Никитин В. В. № 2014145875/13 ; заявл. 14.11.2014 ; опубл. 20.03.2016, Бюл. № 8. 4 с.
23. Perspectives of Grain Pile Separation Before it Enters the Thresh-ER / V. N. Ozherelyev [et al.] // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. P. 114–116. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>
24. Ozherelyev V. N., Nikitin V. V., Komogortsev V. F. Comparison of Different Methods for Preliminary Separation of Free Grain When Hatcheling Standing Plants // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference. 2021. Vol. 1079, Issue 6. Article no. 062088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062088>
25. Наклонная камера зерноуборочного комбайна : патент 2725729 Российская Федерация / Ожерельев В. Н., Никитин В. В., Синяя Н. В. № 2019128610 ; заявл. 11.09.2019 ; опубл. 03.07.2020, Бюл. № 198. 7 с.
26. Зерноуборочный комбайн : патент 2680666 Российская Федерация / Шабанов Н. П., Хабрат Н. И., Умеров Э. Д. № 2016149302 ; заявл. 14.12.2016 ; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 8. 4 с.
27. Комбайн для уборки зерновых культур на корню : патент 1766310 СССР / Данченко Н. Н., Шкин-дер В. Н., Аблогин Н. Н. [и др.]. № 4670394/15 ; заявл. 06.02.1989 ; опубл. 07.10.1992, Бюл. № 37. 5 с.
28. Зерноуборочный комбайн с очесывающей жаткой : патент 2744619 Российская Федерация / Ряднов А. И., Федорова О. А. № 2020120743 ; заявл. 16.06.2020 ; опубл. 12.03.2021. Бюл. № 8. 4 с.
29. К обоснованию способа предварительной сепарации свободного зерна при очесе растений на корню / В. Н. Ожерельев [и др.] // Наука в центральной России. 2023. № 1 (61). С. 77–84. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-77-84>
30. Single- and Multispecies Farming Ecosystems in Field Forage Production / N. M. Belous [et al.] // Natural Volatiles and Essential Oils. 2021. Vol. 8, Issue 4. P. 7745–7764. EDN: HCGNUO
31. Тишанинов К. Н. Обоснование конструктивно-технологической схемы решетного стана // Наука в центральной России. 2021. № 4. С. 13–17. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-4-13-17>
32. Obtaining High-Quality Grain through the Use of Fractional Technology for Its Cleaning / V. I. Orobinsky [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 640, Issue 2. Article no. 022046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022046>
33. Orobinsky V. I., Gulevsky V. A., Gievsky A. M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture. 2021. Vol. 723, Issue 3. Article no. 032005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>
34. Ways to Reduce Injury to Seeds by the Harvester's Final Threshing Device / V. I. Orobinsky [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture. 2021. Vol. 723, Issue 3. Article no. 032014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032014>
35. Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Сепарация очесанного зернового вороха на решетчатом днище наклонной камеры комбайна // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 3. С. 35–40. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>

Поступила в редакцию 29.06.2023; поступила после рецензирования 01.10.2023; принята к публикации 15.10.2023

Об авторах:

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

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

Заявленный вклад авторов:

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Pyanov V.S. Organization of Motor Transport Operation in Conditions of Large-Commodity Grain Production. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2010;(7):50–51. EDN: [OWWLYL](#)
2. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46–51. Available at: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (accessed 23.06.2023).
3. Aldoshin N.V., Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A., Kalashnikova L.V. New Working Element of Stripper Header “OZON”. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018;55(2):71–76. Available at: <https://clck.ru/38ULes> (accessed: 23.06.2023).
4. Ovchinnikov A.S., Lovchikov A.P., Ryadnov A.I., Fedorova O.A., Konstantinov M.M., Fomin S.D. On the Substantiation of the Technological Scheme of the Combine Harvester with the Stationary Process of Threshing Bread Mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;488(1):012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012057>
5. Glushkov I.N., Konstantinov M.M., Gerasimenko I.V., Ognev I.I., Gretsov A.S., Sarsymbayev S.A. Loading of Harvesters, Requirements for the Stems Grouped after Mowing and Impact Harvesting Equipment for Agricultural Landscapes as Prerequisites Development and Application of Batch Technology for Harvesting Grain Crops. *Proceedings of the International Academy of Agrarian Education*. 2021;(57):36–41. EDN: [DHHJUQ](#)
6. Lovchikov A.P., Ognev I.I. Theoretical Background for the Development of Stationary Process of Grain Mass Threshing with a Combine Harvester. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2020;193:01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019301004>
7. Konstantinov M., Glushkov I., Mukhamedov V., Lovchikov A. Increase in Soil Moisture Reserves Due to the Formation of High Stubble Residues for the Accumulation of Snow Precipitation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;666(5):052049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>
8. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using Combines for Cleaning Grain Crops by Non-Traditional Technologies. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27–32. Available at: <https://clck.ru/38UPX4> (accessed: 23.06.2023). (In Eng.)
9. Savin V.Yu. Dependence of the Degree of Wheat Grain Crushing on the Speed of the Comber. *Voronezh State Agrarian University Bulletin*. 2018;(3):98–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.3.98>
10. Alabushev A.V., Buryanov A.I., Pakhomov V.I., Kolinko A.A., Chervyakov I.V. Development of a Method to Control Threshing Process Based on Properties of Harvested Crop Variety and External

Factors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;422(3):012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012005>

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

12. Chaplygin M.E., Tronev S.V., Davydova S.A. Soybean Harvesting Using Current Dedicated Headers and Adapters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;659(1):012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012014>

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

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

15. Savin V.Yu. [Stripping Device]. Patent 2,726,110 Russian Federation. 2020 July 9. (In Russ.)

16. Savin V.Yu. [Stripping Device]. Patent 2,751,846 Russian Federation. 2021 July 19. 4 p. (In Russ.)

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

18. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V., Alakin V.M., Stanovov S.N. Study of the Parameters of a Combed Grain Heap. *Technology in agriculture*. 2013;(1):7–9. (In Russ.) EDN: TZNNGD

19. Kukharev O.N., Semov I.N., Fedin M.A. [Removable Comb of Combing Equipment]. Patent 2,646,054 Russian Federation. 2018 March 1. 11 p. (In Russ.)

20. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V., Sinyaya N.V., Chaplygin M.E., Fedina T.O. Combing the Standing Crops with Preliminary Separation of Loose Grains. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(1):73–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>

21. Dyemyentyev A.V., Skorik V.I., Pastukhov B.K. [Inclined Chamber of a Combine Harvester]. Patent 1,687,078 USSR. 1991 October 30. 5 p. (In Russ.)

22. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. [Inclined Chamber of a Combine Harvester]. Patent 2,577,892 Russian Federation. 2016 March 20. 4 p. (In Russ.)

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

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

25. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Sinyaya N.V. [Inclined Chamber of a Combine Harvester]. Patent 2,725,729 Russian Federation. 2019 September 11. 7 p. (In Russ.)

26. Shabanov N.P., Khabrat N.I., Umerov E.D. [Combine Harvester]. Patent 2,680,666 Russian Federation. 2019 February 25. 4 p. (In Russ., abstract in Eng.)

27. Danchenko N.N., Shkinder V.N., Ablogin N.N., et al. [Combine Harvester for Standing Grain Crops]. Patent 1,766,310 USSR. 1992 October 7. 5 p. (In Russ.)

28. Ryadnov A.I., Fedorova O.A. [Grain Harvester with Stripper Header]. Patent 2,744,619 Russian Federation. 2021 March 12. 4 p. (In Russ., abstract in Eng.)

29. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Komogortsev V.F., Sinyaya N.V. To the Substantiation of the Method of Preliminary Separation of Free Grain in the Root of Plants. *Science in the Central Russia*. 2023;(1):77–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-77-84>

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



31. Tishaninov K.N. Justification of the Design and Technological Scheme Grating Mill. *Science in the Central Russia*. 2021;4:13–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-4-13-17>
32. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Baskakov I.V., Chernyshov A.V. Obtaining High-Quality Grain through the Use of Fractional Technology for Its Cleaning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;640(2):022046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022046>
33. Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture*. 2021;723(3):032005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>
34. Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Baskakov I.V., Podorvanov D.A. Ways to Reduce Injury to Seeds by the Harvester's Final Threshing Device. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, Engineering, Technology, Innovation and Digital Technologies in Agriculture*. 2021;723(3):032014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032014>
35. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Grain Heap Separation at the Grates of a Combine Feederhouse. *Agricultural Engineering*. 2023;25(3):35–40. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>

Submitted 29.06.2023; revised 01.10.2023; accepted 15.10.2023

About the authors:

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

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

Authors contribution:

V. V. Nikitin – analyzing literary data, preparing the original version of the text and finalizing the text, conducting experiments and processing their results.

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

All authors have read and approved the final manuscript.



Технико-экономическая эффективность применения многофункциональных контейнеров в первичном семеноводстве зерновых культур

М. Е. Чаплыгин✉, К. А. Степанов

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

✉ misha2728@yandex.ru

Аннотация

Введение. Широко распространенная в настоящее время технология производства селекционных семян связана с ручной межоперационной перевалкой больших объемов мешкотары, что со временем вызывает повреждение самой мешкотары и ухудшает условия хранения зерна. В связи с этим возникает необходимость в создании многофункционального жесткого контейнера, который обеспечит экономическую эффективность хранения семенного зерна за счет герметичности и контроля внутренней среды.

Цель исследования. Предложить конструкцию многофункционального контейнера для первичного семеноводства зерновых культур с обоснованием по критериям технико-экономической эффективности в сравнении с паллетоместом и мешкотарой.

Материалы и методы. Для оценки влияния сокращения межоперационной перевалки больших объемов мешкотары и потерь семян в первичном семеноводстве зерновых культур был применен государственный стандарт экономической оценки сельскохозяйственной техники. В качестве исследуемой сельскохозяйственной культуры использовались семена пшеницы. Обслуживающей техникой были приняты селекционно-семеноводческий комбайн Wintersteiger Delta с шириной захвата жатки 2 м, системой затаривания семян в мешки или зерновым бункером 1,5 м³, трактор «Беларус-622» с полуприцепом 1ПТС-2, тельфер электрический TOR CD1 10916, конвейерные зерносушильные установки на базе зерносушилки лотковой СЛ-0,3х2.

Результаты исследования. Авторами статьи была проведена оценка технико-экономической эффективности применения мешкотары и многофункционального контейнера на технологических операциях уборки, транспортировки и сушки семян. Так, при годовом условном объеме работ в 400,7 т экономия совокупных затрат денежных средств для селекционно-семеноводческого комбайна составляет в среднем 117,9 тыс. руб. Снижение себестоимости выполнения работы – 32,8 %, срок окупаемости составляет 2 года, снижение потребности в обслуживающем персонале и в комбайнах не выявлено. При этом снижение потребности в источниках энергии составило 32,3 %.

Обсуждение и заключение. Установлено, что во время технологических операций уборки, транспортировки и сушки наилучшие показатели обеспечиваются в производстве семян с применением многофункционального контейнера в условиях следующих показателей удельного грузооборота, p : $U_i = 800$ т/км²; $L_r = 0,15$ км; $b = 0,01$ км; $L_{п-т} = 0,5$ км, начальная влажность семян – 21 %. В процессе использования данного контейнера снижается себестоимость выполнения работ, а также потребность в обслуживающем персонале, источниках энергии и технике.

© Чаплыгин М. Е., Степанов К. А., 2024



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

Ключевые слова: многофункциональный контейнер, первичное семеноводство, зерновые культуры, технологические операции, уборка зерна, сушка зерна, хранение зерна, экономическая эффективность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Для цитирования: Чаплыгин М. Е., Степанов К. А. Технико-экономическая эффективность применения многофункциональных контейнеров в первичном семеноводстве зерновых культур // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 44–71. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.044-071>

Original article

Technical and Economic Efficiency of Using Multifunctional Containers in Primary Seed Production of Grain Crops

M. E. Chaplygin[✉], K. A. Stepanov
*Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)*

[✉] misha2728@yandex.ru

Abstract

Introduction. A very common technology of pedigree seed production is associated with manual in-process transshipment of many sacks that over time results in damaged sacks and in worsening of grain storage conditions. In this regard, there is a need to design a multifunctional rigid container, which will provide cost-effective storage of seed grain through the airtightness and control of the indoor environment.

Aim of the Study. The study is aimed at designing a multifunctional container for primary seed production of grain crops with justification according to the criteria of technical and economic efficiency in comparison with pallet spaces and sacks.

Materials and Methods. The state standard for economic evaluation of agricultural machinery was applied to assess the impact of reducing in-process transshipment of many sacks and seed losses in primary seed production of grain crops. Wheat seeds were used as the seed-producing crop under study. As service equipment there were used Wintersteiger Delta plot combine with a cutterbar working width of 2 m, seed bagging system or grain hopper 1.5 m³, Belarus 622 tractor with 1PTS-2 semi-trailer, TOR CD1 10916 electric telfer, and convective grain drying units on the basis of SL-0.3x 2 tray dryer for grain.

Results. The authors of the article have estimated the technical and economic efficiency of using sacks and multifunctional containers in technological operations of harvesting, transporting and drying grain. With the annual notional volume of work in 400.7 tons, the saving of total money costs for a plot seed combine-harvester averages 117.9 thousand rubles. The reduction in the cost of work performance is 32.8%, payback period is 2 years; the decrease in the need for service personnel and harvesters is not revealed. At the same time, the reduction in the need for energy sources is 32.3%.

Discussion and Conclusion. It has been determined that during technological operations of harvesting, transporting and drying, the best seed production performance is when using the multifunctional container with the following indicators of specific cargo turnover, p : $U_r = 800 \text{ t/km}^2$; $L_r = 0.15 \text{ km}$; $b = 0.01 \text{ km}$; $L_{n-r} = 0.5 \text{ km}$, initial humidity of seeds is 21%. In the process of using this container, the production cost, need for service personnel, energy sources and machinery are reduced.

Keywords: multifunctional container, primary seed production, grain crops, technological operations, harvesting, drying, storage, economic efficiency

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

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

For citation: Chaplygin M.E., Stepanov K.A. Technical and Economic Efficiency of Using Multifunctional Containers in Primary Seed Production of Grain Crops. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):44–71. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.044-071>

Введение

В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации¹, безопасность в указанной области определяется индикаторами продовольственной независимости. В настоящее время пшеница и ячмень занимают главное положение в списке основных культур. Усредненный показатель незащищенного сектора продовольственной независимости в 2022 г. оценивается в 25,6 %², в 2018 – 28,7 %³, в 2014 – 37,2 %⁴.

Повышение эффективности производства семян на уровне селекционных хозяйств и семенных заводов заключается в широкой модернизации технологии производства селекционных семян. В первичном семеноводстве можно выделить четыре операции, которые с применением гибкой мешкотары выполняются неэффективно. К таковым относятся: многократная ручная перевалка семян, при которой повреждается мешкотара и теряются семена; контроль состояния семян по влажности; сушка семян до кондиционной влажности, а также хранение семян с контролируемыми режимами хранения. Необходимо отметить, что контроль влажности и режимов хранения в случае с нахождением семян в мешкотаре затруднен.

Таким образом, замена мешкотары на многофункциональный жесткий контейнер для первичного семеноводства зерновых культур – важная задача. При этом исключаются технологические недостатки мешкотары, появляется возможность замены ручного труда при перевалке семян, погрузке и разгрузке тары на высокоавтоматизированный [1; 3]. В качестве исследуемой культуры были приняты семена пшеницы, занимающие 45 % посевных площадей и объем рынка семян в 7,4 млн т⁵, что может позволить перераспределить освободившуюся технику

¹ Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс] : Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20. URL: <https://base.garant.ru/73438425/> (дата обращения: 04.11.2023).

² Растениеводство в России: урожай 2022 года, импортозамещение, статистика по экспорту [Электронный ресурс]. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rastenievodstvo-v-rossii-urozhay-2022-goda-importozameshchenie-statistika-po-eksportu/11> (дата обращения: 04.11.2023).

³ Дачники и аграрии столкнутся с проблемами из-за избыточного контроля импорта семян [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax.ru/russia/703920> (дата обращения: 04.11.2023).

⁴ Кубань за 5 лет планирует избавиться от импортных семян [Электронный ресурс]. URL: <https://rostov.rbc.ru/rostov/25/09/2015/560560e19a79476d67122b54> (дата обращения: 04.11.2023).

⁵ Федеральная служба государственной статистики. Посевные площади, валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2022 году (предварительные данные) [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/29_cx_predv_2022.xlsx (дата обращения: 04.11.2023).

и людей на производство культур с недостаточным показателем продовольственной независимости. Применение разработанного технологического контейнера обосновывается по критериям технико-экономической эффективности в сравнении с паллетоместом и мешкотарой.

Обзор литературы

Широкое описание возможностей контейнеризации грузопереработки при размещении труда капиталом, воплощенном в оборудовании, представлено в работе Д. Бауэрскса, Д. Клосса⁶. Основы конструирования контейнерной упаковки для погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ сельскохозяйственных грузов с оценкой влияния конструкций на экономическую эффективность представлены в работе Г. М. Третьякова, И. В. Горюшинского⁷.

Агротехнологии и сельскохозяйственные культуры как объект контейнеризации исследованы в работах А. Ю. Измайлова [4; 5], Н. Е. Евтюшенкова, Р. К. Курбанова [6], А. С. Чулкова [7; 8], где обоснована экономическая эффективность применения адаптивных технических средств транспортной логистики на базе сменных кузовов, обеспечивающих правильную работу с агротехнологиями производства сельскохозяйственной продукции.

В работе Н. М. Латышенко [2] контейнер используется в качестве выделенной единицы хранения запаса. При этом конструкция контейнера обеспечивает экономическую эффективность хранения семенного зерна за счет герметичности и контроля газовой среды внутри контейнера. Предпосылки и перспективы развития контейнеризации сельскохозяйственных культур исследованы также в ряде других работ [9–18].

Настоящая статья предложена авторами как дополнение к работам исследователей контейнеризации транспортного обеспечения зерновых культур. Вместе с этим научный интерес представляет применение концепции адаптивных технических средств в условиях ограничений первичного семеноводства, где годовой условный объем работ составляет менее 1 тыс. т. Объем бункеров селекционно-семеноводческих комбайнов меньше объема уже обоснованных для продовольственного зерна конструкций сменных кузовов. Перевозки регламентируются законом Российской Федерации «О семеноводстве»⁸, а сушка семян ограничена предельной температурой нагрева в 40–45 °С и предельной неравномерностью влажности семян после сушки в $\pm 1,5$ %. При этом необходимо обеспечить чистоту творческого селекционного процесса, сохранность и жизнеспособность семян на всех технологических операциях производства. Применение дорогостоящей техники при сравнительно небольших объемах работы побуждает исследовать возможности обоснования комплексного повышения производительности технологического оборудования⁹.

⁶ Бауэрскс Д. Дж., Клосс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. М. : Олимп-Бизнес, 2017. 640 с.

⁷ Третьяков Г. М., Горюшинский И. В., Горюшинский В. С. Контейнерно-транспортные системы в агропромышленном комплексе. М. : Колос-Пресс, 2002. 224 с.

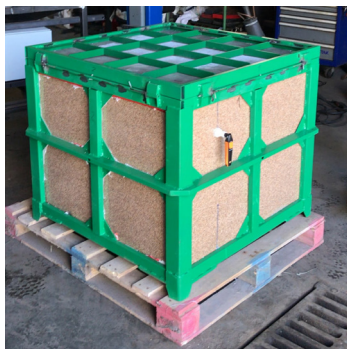
⁸ О семеноводстве [Электронный ресурс] : Закон Российской Федерации от 22.12.2021 № 454-ФЗ. URL: <https://base.garant.ru/403332751/> (дата обращения: 04.11.2023).

⁹ ГОСТ 46-72-78. Параметры опытного поля, схемы посева и требования к типу посевных и уборочных машин в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве зерновых и зернобобовых культур. Параметры элементов опытного поля по этапам работ : дата введения 1978-01-01.

Анализ работ таких авторов как Л. А. Пестряков, А. И. Бурьянов, С. В. Власова, Э. В. Жалнин, А. Ю. Измайлов, М. Л. Крюков и А. В. Голубкович [19–26] показал, что актуальным техническим решением и способом, наиболее полно обеспечивающим комплексное повышение производительности производства семян, является сменный сушильно-транспортный контейнер, конструкция которого минимизирует перевалку семян при погрузке и разгрузке, а также обеспечивает изоляцию семян от внешней среды при доступе агента сушки. Модульность и закрытость конструкции позволила заложить функцию реверса контейнера, использующуюся, например, при пересыпании семян. Использование реверса в процессе сушки позволяет увеличить разово высушиваемый слой¹⁰ и, следовательно, разовую загрузку зерносушилки и транспортных средств. Недостатком такой конструкции является нарушение качества технологического процесса сушки и хранения семян в контейнерах из-за отсутствия возможности отбора проб семян из контейнера, находящегося в штабеле или в перевернутом положении. Также не найдена зависимость, позволяющая рассчитать время реверсивной сушки семян. Таким образом, может являться рациональной разработка многофункционального контейнера для транспортировки, сушки, хранения, погрузки и разгрузки селекционных семян зерновых культур с устранением конструктивных недостатков прототипа.

Материалы и методы

В процессе исследования был разработан многофункциональный контейнер для первичного семеноводства зерновых культур, габариты которого составили 1000х995х820 мм, а вместимость – 0,5 м³. Он включает каркас с боковыми стенками, перфорированные днище и крышку, возможность эксплуатации с селекционно-семеноводческим комбайном, виловым погрузчиком, тельфером, функцию вращения кантователем в процессе сушки или пересыпания семян из него (рис. 1).



Р и с. 1. Многофункциональный контейнер для первичного семеноводства зерновых культур

F i g. 1. Multifunctional container for primary seed production of grain crops

В качестве техники были использованы такие машины как селекционно-семеноводческий комбайн Wintersteiger Delta [27; 28] с шириной захвата жатки 2 м и системой затаривания семян в мешки (либо зерновым бункером 1,5 м³), трактор

¹⁰ Уколов В. С. Сушка семян в камерных сушилках с реверсивной подачей воздуха // Теория и техника сушки зерна: труды научной конференции 15–17 апреля 1969 г. – М : ВНИИЗ, 1969. С. 181–190.

«Беларус-622» с полуприцепом ИПТС-2, тельфер электрический TOR CD1 10916, конвективные зерносушильные установки на базе зерносушилки лотковой СЛ-0,3х2. Основные исходные данные оценки экономической эффективности представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Исходные данные оценки экономической эффективности

Cost-effectiveness baseline

Символ / Symbol	Описание / Description	Числовое значение на операции по аналогичной (новой) технике / Numeric value for analog (new) technology operations		
		Уборка / Harvesting	Транспор- тировка / Transporting	Сушка / Drying
1	2	3	4	5
$\lambda_{смj}$	Количество основного и вспомогательного персонала (механизаторы и вспомогательные рабочие), обслуживающего самоходную технику МТА за 1 ч. сменного времени на i -м виде работы, чел. / Number of main and auxiliary personnel (machine operators and auxiliary workers) servicing self-propelled equipment of MTA per 1 h. of shift time in the i type of work, people	1	3 / 1	2 / 1
$W_{смj}$	Производительность техники МТА за 1 ч. сменного времени на i -м виде работы, т/ч / Equipment productivity of MTA per 1 h. of shift time in the i type of work, t/hour	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation
τ_k	Часовая оплата труда обслуживающего персонала k -ой квалификации, руб/чел / Hourly wages of service personnel with k qualification, ruble/person	187,5	187,5	187,5
n_3	Коэффициент, учитывающий уровень социальных отчислений от зарплаты, регламентируемых законодательством конкретного государства / Coefficient that takes into account the level of social deductions from wages regulated by the legislation of a particular state	1,302	1,302	1,302
g_{Ti}	Удельный расход моторного топлива (электроэнергии, газа), кг/т / Specific consumption of motor fuel (electricity, gas), kg/t	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation
Π_t	Цена топлива (электроэнергии, газа), руб/кг (кВт*ч) / Price of fuel (electricity, gas), ruble/kg (kWh)	42	42	5,5
$K_{см.м}$	Коэффициент учета цены смазочных материалов / Lubricant price factor	1,25	1,25	1
B_{mj}	Цена j -ой техники (без НДС), НДЕ / Price of j equipment (excluding VAT), national currency	13 000 000	2 170 000	419 000
K_{pj}	Значение отчислений на ремонт и техническое обслуживание от цены j -ой техники на 100 ч. ее работы, принятые в конкретном государстве, % / Value of deductions for repair and maintenance from the price of j equipment per 100 h. of its operation, adopted in a particular state, %	2,43	0,98	1,5

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5
$K_{смj}$	Коэффициент использования сменного времени j -ой техникой за период контрольных смен / Coefficient of use of shift time by j equipment for the period of control shifts	0,7	0,7	0,7
$K_{гj}$	Коэффициент готовности j -ой техники по оперативному времени / Readiness ratio of j equipment by operational time	0,97	0,97	0,97
$K_{тнj}$	Коэффициент технического использования j -ой техники, определяемый по данным испытаний на надежность / Coefficient of technical use of j equipment, determined according to reliability testing data	0,98	0,98	0,98
R_{mj}	Значение амортизационного ресурса j -й техники, ч. / Value of depreciation life of j equipment, h.	2548	11132	3600
g_f	Удельный расход f -го вспомогательного материала, кг/т / Specific consumption of f auxiliary material, kg/t	20 + 2,5 / 2,5	20 + 2,5 / 2,5	20 + 2,5 / 2,5
$R_{в.мf}$	Цена единицы f -го вспомогательного технологического материала, руб/кг (м, шт.) / Unit price of f auxiliary technological material, ruble/kg (m, pcs.)	25 + 1000 / 12 000		
$Y_{с.х.}$	Урожайность продукции, т/км ² / Product yield, t/km ²	400–800	400–800	400–800
$Ц_{сем}$	Цена семенного материала, руб/т / Price of seed material, ruble/t	17 000	17 000	17 000
$П_B$	Относительная полевая всхожесть семян, % / Relative field germination of seeds, %	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation
$n_{агрj}$	Агротехнический срок выполнения i -го вида работы, принятый в зоне, дней / Agrotechnical period for completing the i type of work adopted in the zone, days	60	20	20
t_i	Возможное время работы техники в сутки на i -м виде работы, ч. / Possible operating time of equipment per day in the i type of work, h.	8	8	24
F_y^r	Годовой условный объем i -го вида работы, т / Annual conditional volume of the i type of work, t	400,75	400,75	400,75
$n_{см}$	Число смен работы обслуживающего персонала в течение суток (целое число), шт. / Number of work shifts of service personnel during the day (integer), pcs.	1	1	3
$Б_{схmj}$	Цена j -й сельхозмашины, НДЕ / Price of j agricultural machine, national currency	0	200 000	215 000
$n_{схmj}$	Число j -х сельхозмашин в МТА, шт. / Number of j agricultural machines in MTA, pcs.	0	1	1
$N_{техi}^r$	Необходимое количество техники на i -м виде работы, шт. / Required amount of equipment for the i type of work, pcs.	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation	Расчет / Calculation

Для расчета показателей производительности техники $W_{смj}$, а также ее потребного количества $N_{техi}^r$ на годовой условный объем сортов принято уравнение:

$$N_{техi}^r = \frac{F_y^r}{F_j^r}, \text{ шт.}, \quad (1)$$

где F_j^r , т – годовой фактический объем i -го технического средства; значение F_y^r принято в расчет на основании плана посевов зерновых Института семеноводства и агротехнологий Всероссийского института механизации «ИСА ВИМ» [29].

Для расчета потребного количества $N_{\text{тех.к.м.}}^r$ принятого в расчет комбайна при использовании мешкотары уравнение (1) будет выглядеть следующим образом:

$$N_{\text{тех.к.м.}}^r = \frac{F_y^r}{W_{\text{см.к.м.}} \cdot t_{\text{к}} \cdot n_{\text{см}}^k \cdot n_{\text{агр.к}}}, \text{ шт.} \quad (2)$$

Для расчета производительности $W_{\text{см.к.м.}}$ принято уравнение:

$$W_{\text{см.к.м.}} = \left(\frac{3,6 \cdot q_{\text{к}} \cdot (1 - \gamma_{\text{м}}) \cdot \tau_{\text{к}}^{\text{м}} \cdot k_{\text{х}}}{(1 + \varepsilon)} \right), \text{ т/ч,} \quad (3)$$

где $q_{\text{к}}$ – пропускная способность комбайна, $q_{\text{к}} = 2,69$ кг/с; $\gamma_{\text{м}}$ – коэффициент вариации подачи хлебной массы, $\gamma_{\text{м}} = 0,15$; $k_{\text{х}}$ – коэффициент, учитывающий состояние убираемого хлебостоя, $k_{\text{х}} = 0,95$; ε – отношение массы соломы к массе зерна, $\varepsilon = 0,8$; $\tau_{\text{к}}^{\text{м}}$ – коэффициент использования времени смены при использовании мешкотары рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{к}}^{\text{м}} = \left(1 - \frac{t_{\text{обсл}}}{t_{\text{к}}} \right) \cdot \tau_{\text{р}}^{\text{м}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{обсл}}$ – вспомогательное время, $t_{\text{обсл}} = 1,2$ ч.; $t_{\text{к}}$ – время смены оператора комбайна, $t_{\text{к}} = 8$ ч.; $\tau_{\text{р}}^{\text{м}}$ – коэффициент работы комбайна при использовании мешкотары, относящийся только к намолоту зерна, определяется следующим образом:

$$\tau_{\text{р}}^{\text{м}} = \frac{t_{\text{бз}}}{t_{\text{ц.к}}^{\text{м}}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{бз}}$, ч. – время на уборку до полного заполнения бункера зерном определяется соотношением:

$$t_{\text{бз}} = \frac{V_{\text{б}} \cdot \rho \cdot (1 + \delta_{\text{с}})}{3,6 \cdot q_{\text{к}} \cdot K_{\text{п}}}, \text{ ч.,} \quad (6)$$

где $V_{\text{б}}$, м^3 – объем бункера; ρ – насыпная плотность пшеницы, $\rho = 0,715$ т/ м^3 ; $\delta_{\text{с}}$ – выход побочной продукции по отношению к основной, $\delta_{\text{с}} = 0,9$; $K_{\text{п}}$ – коэффициент уменьшения пропускной способности комбайна, $K_{\text{п}} = 1$.

Время цикла комбайна при использовании мешкотары $t_{\text{ц.к}}^{\text{м}}$ представляет собой сумму:

$$t_{\text{ц.к}}^{\text{м}} = t_{\text{бз.к1}} + t_{\text{пов.ц.к2}} + t_{\text{рг.к3}}^{\text{м}}, \text{ ч.,} \quad (7)$$

где $t_{\text{пов.ц.к2}}$ – время, затрачиваемое комбайном на прохождение поворотов:

$$t_{\text{пов.ц.к2}} = \frac{R_{\text{хх.к}} \cdot \sum n_{\text{пов}}}{v_{\text{пов}} \cdot \frac{L_{\text{г}}}{t_{\text{бз}} \cdot v_{\text{бз}}}}, \text{ ч.,} \quad (8)$$

где R_{xx_k} , км – путь холостого хода комбайна, $R_{xx_k} = 0,04$ км; $\sum n_{пов}$, шт. – общее количество поворотов на поле. При ширине поля $B_{п} = 0,48$ км; $\sum n_{пов} = 233$ шт.; $v_{пов}$ – скорость прохождения поворотов, $v_{пов} = 4,4$ км/ч; L_r – длина гона, $L_r = 0,05–0,25$ км; $v_{бз}$ – скорость при комбайнировании, $v_{бз} = 4,2$ км/ч. $v_{бз}$.
 $t_{ргз}^M$ – время разгрузки семян, $t_{ргз}^M = 0,03$ ч. (рис. 2а, 2б).



Р и с. 2. Погрузочно-разгрузочные работы на операции уборки, транспортировки и сушки с применением мешкотары

F i g. 2. Handling operations during harvesting, transporting and drying of grain with the use of sacks

Удельный расход моторного топлива при использовании мешкотары $g_{T_{к.м}}$ определяется по формуле:

$$g_{T_{к.м}} = \frac{G_{T_k} \cdot t_{п.к}^M}{V_6 \cdot \rho}, \text{ кг/т}, \quad (9)$$

где G_{T_k} , кг/ч – часовой расход топлива. Для комбайна Wintersteiger Delta $G_{T_k} = 11,87$ кг/ч.

Для расчета производительности $W_{см.т.м}$ и потребного количества $N_{тех.т.м}^r$ принятого в расчет транспортного средства (ТС) при использовании мешкотары получим по формуле (1) уравнение потребного количества транспортных средств:

$$N_{тех.т.м}^r = \frac{F_y^r}{W_{см.т.м} \cdot t_T \cdot n_{см}^T \cdot n_{агр.т}}, \text{ шт.} \quad (10)$$

Для расчета $W_{см.т.м}$ принято следующее уравнение:

$$W_{см.т.м} = \frac{n_{п.м.i_{макт}} \cdot n_{уп.т.п.м} \cdot q_{н.уп}^M \cdot \frac{t_{см.ф.т}}{t_{п.т.м}^{T.M}}}{t_{см.ф.т}}, \text{ т/ч}, \quad (11)$$

где $n_{п.м.i_{макт}}$ – максимальное количество паллетомест, размещаемых в кузове ТС, определяющееся в соответствии с i -вариантами размещения при продольном, поперечном и комбинированном размещении $n_{п.м.i_{макт}} = 3$ шт.; $n_{уп.т.п.м}$ – количество упаковок на паллетоместе, $n_{уп.т.п.м} = 8$ шт.; $q_{н.уп}^M$ – вместимость единицы упаковки. При использовании мешкотары $q_{н.уп}^M = 0,05$ т; $t_{см.ф.т}$ – фактическая длительность смены операторов транспортировки, $t_{см.ф.т} = t_T - t_{обсл}$.

Время цикла ТС при использовании мешкотары $t_{цт}^M$ рассматривается по формуле:

$$t_{цт}^M = t_{рг-кпт1} + t_{зг-зг_{т2}} + t_{зг_{т3}} \cdot n_{зг} + t_{зг-кпт4} + t_{кп-вз_{т5}} + t_{вз_{т6}} + t_{вз-рг_{т7}} + t_{рг_{т8}}, \text{ ч.}, \quad (12)$$

где $t_{рг-кпт1}$, ч. – продолжительность переезда ТС от места разгрузки до края поля (без груза).

Время движения ТС при подборе груза $t_{зг-зг_{т2}}$ определяется соотношением:

$$t_{зг-зг_{т2}} = \frac{\sum_{k=1..24} d_k^{\text{ближ}} \cdot 10^{(-2)} \cdot L_r}{v_{зг-зг}}, \text{ ч.}, \quad (13)$$

где $\sum_{k=1..24} d_k^{\text{ближ}}$ – доля пройденного пути через 24 ближайшие точки загрузки (для трех паллетомест по 8 грузовых единиц), длина гона $L_r = 50\text{--}250$ м, ширина захвата жатки зерноуборочного комбайна $B_{ж} = 1,25\text{--}2,3$ м [30]:

$$\sum_{k=1..24} d_k^{\text{ближ}} = 2,36 - 0,006L_r + 0,86B_{ж} - 0,002L_r \cdot B_{ж}. \quad (14)$$

$v_{зг-зг}$ – скорость передвижения между точками загрузки, $v_{зг-зг} = 10$ км/ч.; $t_{зг_{т3}}$ – продолжительность загрузки, $t_{зг_{т3}} = 0,012$ ч. (рис. 2с); $n_{зг}$ – количество операций загрузки ТС за единичный цикл, $n_{зг} = 8$; $t_{зг-кпт4}$, ч. – продолжительность переезда ТС места загрузки к краю поля (по стерне, с грузом); $t_{кп-вз_{т5}}$, ч. – продолжительность переезда ТС от края поля до пункта взвешивания (с грузом); $t_{вз_{т6}}$ – продолжительность взвешивания груза и оформления сопутствующих документов, $t_{вз_{т6}} = 0,06$ ч.; $t_{вз-рг_{т7}}$, ч. – продолжительность переезда ТС от пункта взвешивания до места разгрузки (с грузом); $t_{рг_{т8}}$ – продолжительность разгрузки ТС, $t_{рг_{т8}} = 0,014$ ч. (рис. 2д).

Удельный расход моторного топлива транспортного средства при использовании мешкотары $g_{T.M}$ определяется по формуле:

$$g_{T.M} = \frac{G_{T_r} \cdot t_{цт}^M}{n_{пм.i\max}^M \cdot n_{упт.пм} \cdot q_{n_{т.уп}}^M}, \text{ кг/т}, \quad (15)$$

где G_{T_r} – часовой расход топлива для трактора «Беларус-622», $G_{T_r} = 14,3$ кг/ч.

При расчете производительности $W_{см.с.м}$ и потребного количества $N_{тес.с.м}^r$ принятой зерносушилки с использованием мешкотары получим по формуле (1) уравнение потребного количества транспортных средств:

$$N_{тес.с.м}^r = \frac{F_y^r}{W_{см.с.м} \cdot t_c \cdot n_{см}^c \cdot n_{агр.с}}, \text{ шт.} \quad (16)$$

Для расчета $W_{см.с.м}$ принято уравнение:

$$W_{см.с.м} = \frac{G_{вл.3} \cdot \frac{t_{см.ф.т}}{t_{ц.с}^M}}{t_{см.ф.с}}, \quad (17)$$

где $G_{\text{вл.з}}$ – разовая загрузка влажного зерна в зерносушилку, $G_{\text{вл.з}} = 0,4$ т; $t_{\text{см.фс}}$, ч. – фактическая длительность смены операторов сушки, $t_{\text{см.фс}} = t_{\text{с}} - t_{\text{обсл.}}$.

Время цикла сушки при использовании мягкой тары $t_{\text{иц}}^{\text{м}}$ определяется по формуле:

$$t_{\text{иц}}^{\text{м}} = t_{\text{згс1}}^{\text{м}} + t_{\text{сушс2}}^{\text{м}} + t_{\text{ргс3}}^{\text{м}}, \text{ ч.}, \quad (18)$$

где $t_{\text{згс1}}^{\text{м}}$ – продолжительность загрузки зерносушилки при использовании мешкотары, $t_{\text{згс1}}^{\text{м}} = 0,06$ ч. (рис. 2е); $t_{\text{сушс2}}^{\text{м}}$, ч. – время сушки семян в стационарном слое определяется из соотношения [7]:

$$t_{\text{сушс2}}^{\text{м}} = \frac{(U_{\text{н}} - U_{\text{к}}) \cdot r \cdot H}{\alpha \cdot (t_{\text{аг}} - \theta_{\text{ср}}) \cdot f \cdot \eta \cdot h_{\text{н}}}, \text{ ч.}, \quad (19)$$

где $U_{\text{н}}$, $U_{\text{к}}$, кг вл/кг сух. материала – начальное и конечное влагосодержание семян, $U_{\text{н}} = 0,25$ – $0,43$ кг вл/кг сух. материала, $U_{\text{к}} = 0,16$ кг вл/кг сух. материала; r – теплота парообразования влаги, $r \approx 2\,730$ кДж/кг; H – высота слоя семян, $H = 0,3$ м; α – коэффициент теплоотдачи, $\alpha \approx 17,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$; $t_{\text{аг}}$ – температура агента сушки, $t_{\text{аг}} = 40$ °C; $\theta_{\text{ср}}$ – начальная средняя температура семян, $\theta_{\text{ср}} \approx 25$ °C; f – удельная поверхность семян, $f \approx 3$ м²/кг.

η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги, рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{Q_{\text{w}}}{Q_{\Sigma}}, \text{ кВт}, \quad (20)$$

где Q_{w} – расход тепла на испарение влаги при использовании технологии мягкой тары.

$$Q_{\text{w}} = G_{\text{вл}} \cdot [(r + c_{\text{n}} \cdot t_{\text{аг}}) - c_{\text{в}} \cdot \theta_{\text{ср}}], \quad (21)$$

где $G_{\text{вл}}$ – количество испаряемой влаги в процессе сушки:

$$G_{\text{вл}} = G_{\text{вл.з}} \cdot 10^3 \cdot \frac{(W_{\text{н}} - W_{\text{к}})}{(100 - W_{\text{к}})}, \text{ кг}, \quad (22)$$

где $W_{\text{н}}$, $W_{\text{к}}$, % – начальная и конечная влажность зерна, $W_{\text{н}} = 20$ – 30 %, $W_{\text{к}} = 14$ %; c_{n} – теплоемкость водяного пара, $c_{\text{n}} = 1,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, $c_{\text{в}} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; Q_{Σ} , кВт – общий расход тепла на сушку:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{w}} + Q_{\text{з}} + Q_{\text{п}}, \text{ кВт}, \quad (23)$$

где $Q_{\text{з}}$ – расход тепла на нагревание зерна в зерносушилке рассчитывается следующим образом:

$$Q_{\text{з}} = G_{\text{с.з}} \cdot c_{\text{з}} \cdot (t_2 - \theta_{\text{ср}}), \text{ кВт}, \quad (24)$$

где $G_{\text{с.з}}$ – масса высушенного зерна в зерносушилке представляет сумму:

$$G_{\text{с.з}} = 0,85 \cdot (G_{\text{вл.з}} - G_{\text{вл}}), \text{ кг}; \quad (25)$$

где c_3 – теплоемкость зерна рассчитывается по формуле:

$$c_3 = 0,01 \cdot W_n \cdot c_b + 0,01 \cdot (100 - W_n) \cdot c_c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad (26)$$

где c_c – теплоемкость сухого вещества зерна. Для зерна пшеницы удельная теплоемкость сухого вещества $c_c = 1,256 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; t_2 – температура зерна в конце сушки, $t_2 = 40^\circ\text{C}$.

Потери тепла в окружающую среду Q_{Π} вычислим следующим образом:

$$Q_{\Pi} = 0,1 \cdot Q_w, \text{ кВт}. \quad (27)$$

Высота пограничного слоя семян $h_n = 0,35 \text{ м}$.

Продолжительность разгрузки зерносушилки при использовании мешкотары $t_{\text{рг}3}^M = 0,07 \text{ ч}$. (рис. 2f).

Удельный расход электроэнергии при использовании мешкотары $g_{T_{\text{т.м}}}$ определяется по формуле:

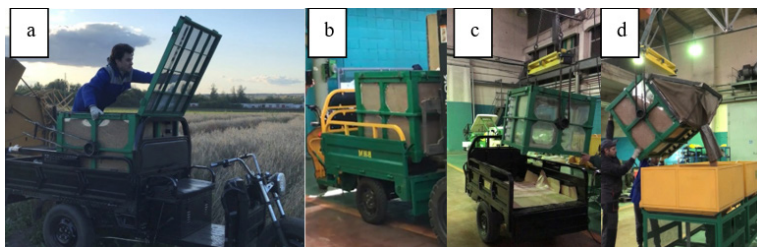
$$g_{T_{\text{к.м}}} = \frac{G_{T_c} \cdot t_{\text{ц.т}}^M}{G_{\text{вл.3}}}, \text{ кВт/т}, \quad (28)$$

где G_{T_c} – часовой расход электроэнергии для зерносушилки лотковой СЛ-0,3х2, $G_{T_c} = 14,4 \text{ кВт/ч}$.

Расчет производительности $W_{\text{смк.к}}$ и потребного количества $N_{\text{тех.к.к}}^{\Gamma}$ принятого в расчет комбайна при использовании многофункционального контейнера отличается учетом времени ожидания ТС. Тогда формула (7) примет вид:

$$t_{\text{ц.к}}^K = t_{\text{бз.к1}} + t_{\text{пов.ц.к2}} + t_{\text{ож.к3}} + t_{\text{рг.к4}}^K, \text{ ч}. \quad (29)$$

К расчетам принимаются численные значения объема бункера $V_6 = 1,5 \text{ м}^3$, время разгрузки семян при использовании многофункционального контейнера $t_{\text{рг.к4}}^K = 0,009 \text{ ч}$. (рис. 3а). Остальные числовые значения принимаются идентичными при расчетах с использованием мешкотары.



Р и с. 3. Погрузочно-разгрузочные работы на операции уборки, транспортировки, сушки с применением многофункционального контейнера

F i g. 3. Handling operations during harvesting, transporting and drying of grain with the use of a multifunctional container

Расчет производительности $W_{\text{смк.к}}$ и потребного количества $N_{\text{тех.т.к}}^{\Gamma}$ принятого в расчет ТС при использовании многофункционального контейнера отличается учетом

Technologies, machinery and equipment

времени ожидания намолота семян комбайном. Тогда формула (12) примет вид:

$$t_{цт}^K = t_{рг-кп_{т1}} + t_{ож_{т2}} + t_{кп-зг_{т3}} + t_{зг_{т4}} + t_{зг-кп_{т5}} + t_{кп-вз_{т6}} + t_{вз_{т7}} + t_{вз-рг_{т8}} + t_{рг_{т9}}, \text{ ч.}, \quad (30)$$

где $t_{ож_{т2}}$, ч. – продолжительность пребывания ТС у поля в ожидании намолота зерна комбайном. $t_{ож_{т2}}$ принимается равным нулю, если $t_{рг-кп_{т1}} + t_{кп-зг_{т3}} + t_{зг-кп_{т5}} + t_{кп-вз_{т6}} + t_{вз_{т7}} + t_{вз-рг_{т8}} + t_{рг_{т9}} < t_{бзк1} + t_{пов.цк2}$ (для $t_{ож_{т2}}$ применяется обратное условие); $t_{кп-зг_{т3}}$, ч. – продолжительность переезда ТС от края поля до места загрузки (по стерне, без груза $d_k^{ближ} \approx 0,5$, $n_{зг} = 1$, $v_{кп-зг} = 9,2$ км/ч); продолжительность загрузки $t_{зг_{т4}} = 0,009$ ч. (рис. 3а); продолжительность переезда ТС от места загрузки до края поля $t_{зг-кп_{т5}} \approx t_{кп-зг_{т3}}$; $t_{кп-вз_{т6}}$, ч. – продолжительность переезда ТС от края поля до пункта взвешивания (с грузом $v_{кп-вз} = 16,8$ км/ч); $t_{вз_{т7}}$, ч. – продолжительность взвешивания груза и оформления сопутствующих документов, $t_{вз_{т7}} = 0,06$ ч; $t_{вз-рг_{т8}}$, ч. – продолжительность переезда ТС от пункта взвешивания до места разгрузки (с грузом, $v_{вз-рг} = 16,8$ км/ч); продолжительность разгрузки ТС $t_{рг_{т9}} = 0,007$ ч. (рис. 3б, с). К расчетам также принимаются числовые значения $n_{упт.пм} = 1$ шт.; $q_{n_{т.уп}}^K = 0,4$ т. Остальные числовые значения принимаются идентичными при расчетах с использованием мешкотары.

Расчет производительности $W_{смс.к}$ и потребного количества $N_{тех.с.к}^T$ принятой в расчет зерносушилки при использовании многофункционального контейнера отличается временем загрузки и разгрузки, а также временем сушки, поскольку в ее процессе применяется реверс слоя семян. Тогда уравнение (19) примет вид:

$$t_{суш.р_{с2}}^K = b_0 + b_1 w_0 + b_2 n + b_3 w_{рев} + b_{12} w_0 n + b_{13} w_0 w_{рев} + b_{23} n w_{рев} + b_{11} w_0^2 + b_{22} n^2 + b_{33} w_{рев}^2, \text{ ч.}, \quad (31)$$

где w_0 , n , $w_{рев}$ – начальная влажность семян, %; количество переворотов контейнера, ед.; момент влажности переворота контейнера, %.

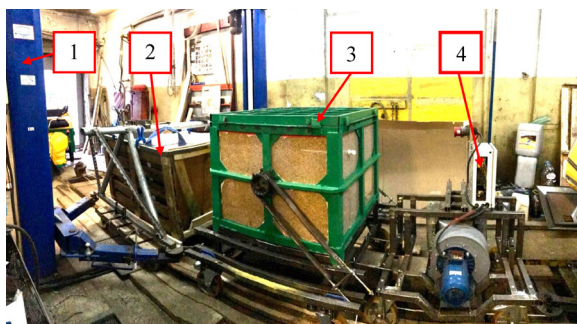
Для определения коэффициентов регрессии уравнения реверсивной сушки $t_{суш.р_{с2}}^K$ в соответствии с разработанной конструкторской документацией был использован стенд комплекта сушильно-транспортного оборудования, а также был проведен трехуровневый эксперимент по плану Бокса-Бенкена¹¹. Испытательный стенд содержит манипулятор-кантователь (1), передвижной контейнер для «биг-бэга» (2), контейнер сушильно-транспортный (3), контейнерную тепловентиляционную установку (4) (рис. 4). В контейнере размещена яровая пшеница «Рима». Диапазоны варьирования факторов приведены в таблице 2.

После преобразований получили уравнение расчета времени реверсивной сушки:

$$t_{суш.р_{с2}}^K = 11,78 - 1,05 w_0 - 0,01 n - 0,05 w_{рев} - 0,005 w_0 n + 0,03 w_0, \text{ ч.} \quad (32)$$

Адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера: $F_{расч} = 0,94$. При $F_{расч} < 1$. Уравнение адекватно на всех уровнях значимости.

¹¹ План эксперимента Бокса-Бенкина [Электронный ресурс]. URL: http://mdop.sourceforge.net/help_pe/index_ru.html



Р и с. 4. Испытательный стенд контейнерного сушильно-транспортного оборудования

F i g. 4. Testing stand for container drying and transporting equipment

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Диапазоны варьирования факторов эксперимента сушки семян

Variation ranges of seed drying experiment factors

Факторы / Factors	w_0 , % – Начальная влажность семян / Initial seed moisture	n – Количество переворотов контейнера / Number of container flips	$w_{\text{пов}}$, % – Момент влажности переворота контейнера / Moment of humidity of container overturn
Диапазон варьирования / Range of variation	20...25...30	2...4...6	14...16...18

Оценка неравномерности семян по влажности после сушки в контрольных точках по высоте слоя 60 см не показала превышений допустимой неравномерности $\pm 1,5$ %.

К расчетам также принимаются числовые значения $t_{3\Gamma_{\text{с1}}}^{\text{к}} = 0,007$ ч., $t_{\text{рг}_{\text{с3}}}^{\text{к}} = 0,04$ ч. (рис. 3d). Остальные числовые значения принимаются идентичными при расчетах с использованием мешкотары.

Производительность и потребное количество принятого в расчет комбайна, зерносушилки с применением мешкотары и многофункционального контейнера могут изменяться в зависимости от внешних условий. Используя параметр удельного грузооборота p , который показывает нагруженность плеча перевозки «поле-ток» погонным урожаем с части поля шириной 1 м, возможно графически иллюстрировать изменения производительности $W_{\text{см}_{\text{К,М}}}$, $W_{\text{см}_{\text{К,К}}}$, $W_{\text{см}_{\text{Т,М}}}$, $W_{\text{см}_{\text{Т,К}}}$ и $N_{\text{тех}_{\text{К,М}}}^{\text{г}}$, $N_{\text{тех}_{\text{К,К}}}^{\text{г}}$, $N_{\text{тех}_{\text{Т,М}}}^{\text{г}}$, $N_{\text{тех}_{\text{Т,К}}}^{\text{г}}$:

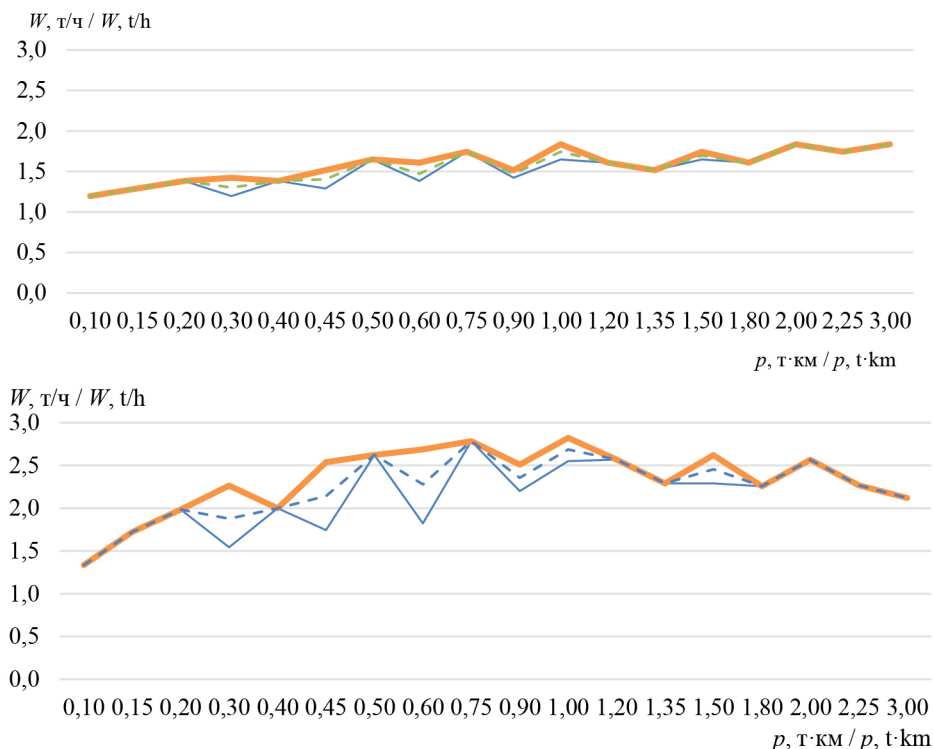
$$W_{\text{см}_i} = f(p); \quad (33)$$

$$N_{\text{тех}_i}^{\text{г}} = f(p); \quad (34)$$

$$p = U_i \cdot L_{\text{T}} \cdot b \cdot L_{\text{п-т}}, \text{ Т·км}, \quad (35)$$

где U_j , т/км² – урожайность культуры, $U_i = 400\text{--}800$ т/км²; L_r , км – длина гона, $L_r = 0,05\text{--}0,25$ км; b – ширина единичного участка поля, $b = 0,01$ км; $L_{п-т}$ – длина участка «поле-ток», $L_{п-т} = 0,5\text{--}1,5$ км.

Тогда изменение производительности комбайна $W_{смк,м}$, $W_{смк,к}$ и $N_{тех,к,м}^r$, $N_{тех,к,к}^r$ по формулам (2), (3) и (29) с учетом (33)–(35) можно проиллюстрировать так, как показано на рисунке 5.



Р и с. 5. Графики изменения производительности селекционно-семеноводческого комбайна Wintersteiger Delta при использовании мешкотары на 50 кг по пшенице (сверху) и многофункционального контейнера (снизу)

F i g. 5. Graphs of changes in productivity of the Wintersteiger Delta plot harvester using a sack for 50 kg of wheat (top) and a multi-functional container (bottom)

Несколько линий на графиках представляют собой максимальные (линия максимальной толщины), минимальные (линия минимальной толщины) и средние значения (штриховая линия средней толщины) при повторяющихся значениях p комбинациями U_j , L_r , $L_{п-т}$. Внутри линий максимального и минимального значения производительности образуется область значений функции, а по промежуточной линии – преобладающие значения производительности. Тогда изменение производительности комбайна $W_{смк,м}$ и $W_{смк,к}$ можно описать уравнениями:

$$W_{смк,м} = 0,89 + 2,26L_r + 4,67U_i \cdot 10^{-4}, \text{ т/ч}; \quad (36)$$

$$W_{\text{см.к.к}} = L_{\text{т}}(18,58 - 28,5L_{\text{т}} - 2,7L_{\text{п-т}}) - \\ - U_i(424,4 - 0,16U_i - 562,5L_{\text{т}} + 92,5L_{\text{п-т}}) \cdot 10^{-5} + (1,47 - 0,38L_{\text{п-т}})L_{\text{п-т}} - 1,25, \text{ т/ч.} \quad (37)$$

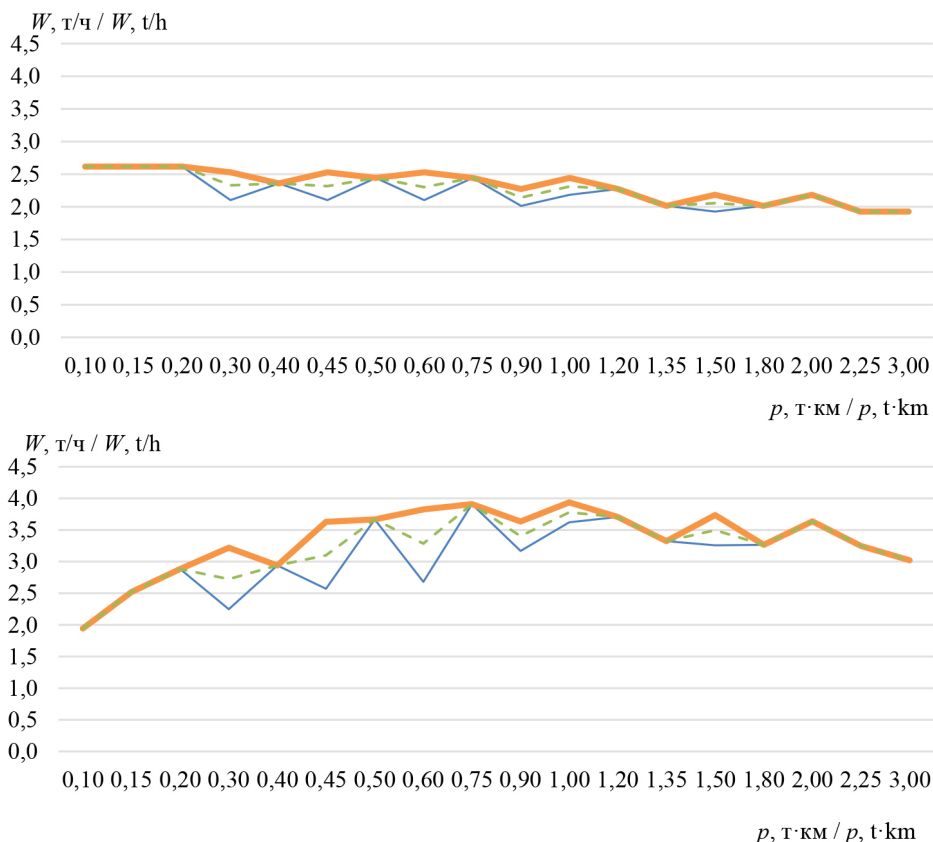
$N_{\text{тех.к.м}}^{\text{г}}$ и $N_{\text{тех.к.к}}^{\text{г}}$ по заданным исходным данным всегда равно 1.

Изменение производительности и потребного количества транспортных средств $W_{\text{см.т.м}}$ и $W_{\text{см.т.к}}$, $N_{\text{тех.т.м}}^{\text{г}}$ и $N_{\text{тех.т.к}}^{\text{г}}$ по формулам (10, 11) и (30) с учетом (33–35) можно проиллюстрировать так, как показано на рисунках 6 и 7.

Изменение $W_{\text{см.т.м}}$ и $W_{\text{см.т.к}}$ можно описать уравнениями:

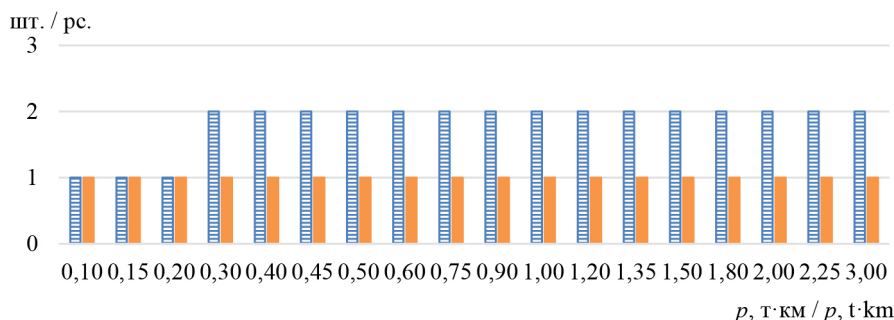
$$W_{\text{см.т.м}} = 2,917 - 0,878 \cdot L_{\text{т}} - 0,514 \cdot L_{\text{п-т}}, \text{ т/ч;} \quad (38)$$

$$W_{\text{см.т.к}} = L_{\text{т}}(26,2 - 41,49L_{\text{т}} - 3,56L_{\text{п-т}}) - \\ - U_i(659,75 - 0,27U_i - 837,91L_{\text{т}} - 126,68L_{\text{п-т}}) \cdot 10^{-5} - \\ - L_{\text{п-т}}(2,26 + 0,64L_{\text{п-т}}) - 1,94, \text{ т/ч.} \quad (39)$$



Р и с. 6. Графики изменения производительности транспортного средства «Беларус-622» с полуприцепом ИПТС-2 при использовании мешкотары на 50 кг по пшенице (сверху) и многофункционального контейнера (снизу)

F i g. 6. Graphs of changes in productivity of Belarus 622 tractor with IPTS-2 semi-trailer when using a sack for 50 kg of wheat (top) and a multifunctional container (bottom)



Р и с. 7. График изменения потребного количества в транспортном средстве «Беларус-622» с полуприцепом 1ПТС-2 при использовании мешкотары на 50 кг по пшенице и multifunctional контейнера

Fig. 7. Graph of change of required amount in Belarus 622 tractor with 1PTS-2 semi-trailer when using a sack for 50 kg of wheat and a multifunctional container

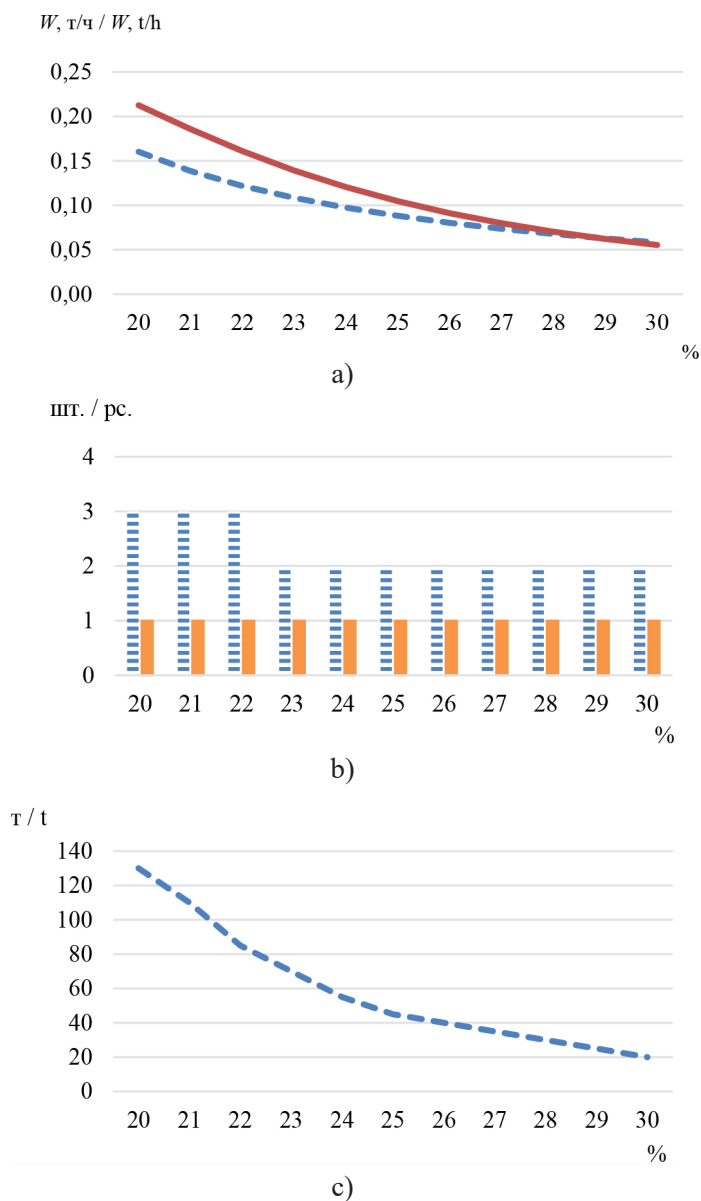
Графическое иллюстрирование изменения производительности и потребного количества зерносушилки $W_{\text{смс.м}}$, $W_{\text{смс.к}}$ и $N_{\text{техс.м}}$, $N_{\text{техс.к}}^{\Gamma}$ по формулам (16), (17) и (32) проводилось в зависимости от начальной влажности семян w_0 . На рисунке 8 (а, б) показано изменение $W_{\text{смс.м}}$, $W_{\text{смс.к}}$ и $N_{\text{техс.м}}^{\Gamma}$, $N_{\text{техс.к}}^{\Gamma}$ при сушке в стационарном слое (штриховая линия) и с применением реверса слоя (сплошная линия) при наиболее эффективном по времени сушки режиме реверса $n = 6$ переворотов и $w_{\text{рев}} = 18\%$. Годовой условный объем работ операции сушки изменяется в зависимости от начальной влажности и проиллюстрирован на рисунке 8с, при котором может сохраняться положительная рентабельность от выручки готовой продукции при использовании мешкотары при рыночной цене семян 17 тыс. руб/т.

Изменение $W_{\text{смс.м}}$ и $W_{\text{смс.к}}$ можно описать уравнениями:

$$W_{\text{смс.м}} = -0,146 + \frac{5,951}{w_0}, \text{ т/с;} \quad (40)$$

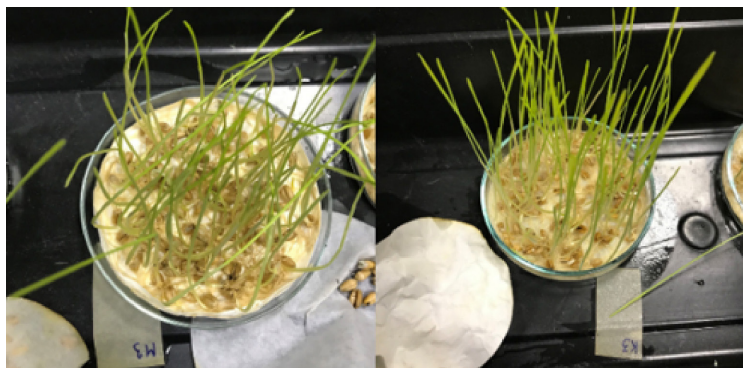
$$W_{\text{смс.к}} = -0,269 + \frac{9,484}{w_0}, \text{ т/ч.} \quad (41)$$

В ходе исследования также была проведена оценка всхожести семян в соответствии с ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести» после 9 месяцев хранения в контейнере и в мешках для получения показателя P_v (рис. 9). Семена хранились в соответствии с пунктом 6 ГОСТ 52325-2005 «Семена сельскохозяйственных растений. Сортные и посевные качества. Общие технические условия» в вентилируемом помещении при температуре от +12 до +23 °C и относительной влажности воздуха 50–70 %. Значения энергии прорастания и всхожести приведены в таблице 3.



Р и с. 8. График изменения производительности (а), потребного количества (б) и годового условного объема работ (с) зерносушилки на базе зерносушилки лотковой СЛ-0,3х2 при использовании мешкотары на 50 кг по пшенице (штриховая линия) и многофункционального контейнера (сплошная линия)

Fig. 8. Graph of change of productivity (a), required amount (b) and annual equivalent performance (c) of grain dryer on the basis of tray grain dryer SL-0,3x2 when using a sack for 50 kg of wheat (dashed line) and multifunctional container (continuous line)



Р и с. 9. Пророщенные семена яровой пшеницы «Рима», хранящиеся в мешках (слева) и многофункциональном контейнере (справа)

Fig. 9. Spring wheat sprouts Rima stored in sacks (left) and multifunctional container (right)

Т а б л и ц а 3
Table 3

Показатели энергии прорастания и всхожести семян яровой пшеницы «Рима», хранящихся в мешках и многофункциональном контейнере

Indicators of germination energy and germinating ability of the spring wheat Rima, stored in sacks and in a multifunctional container

Энергия прорастания, всхожесть, % / Germination energy, germinating ability, %	Срок хранения / Storage time	3 месяца / 3 month	6 месяцев / 6 month	9 месяцев / 9 month
	Мешок / Sack	98 / 98	92 / 96	89 / 91
	Контейнер / Container	98 / 98	94 / 97	96 / 97

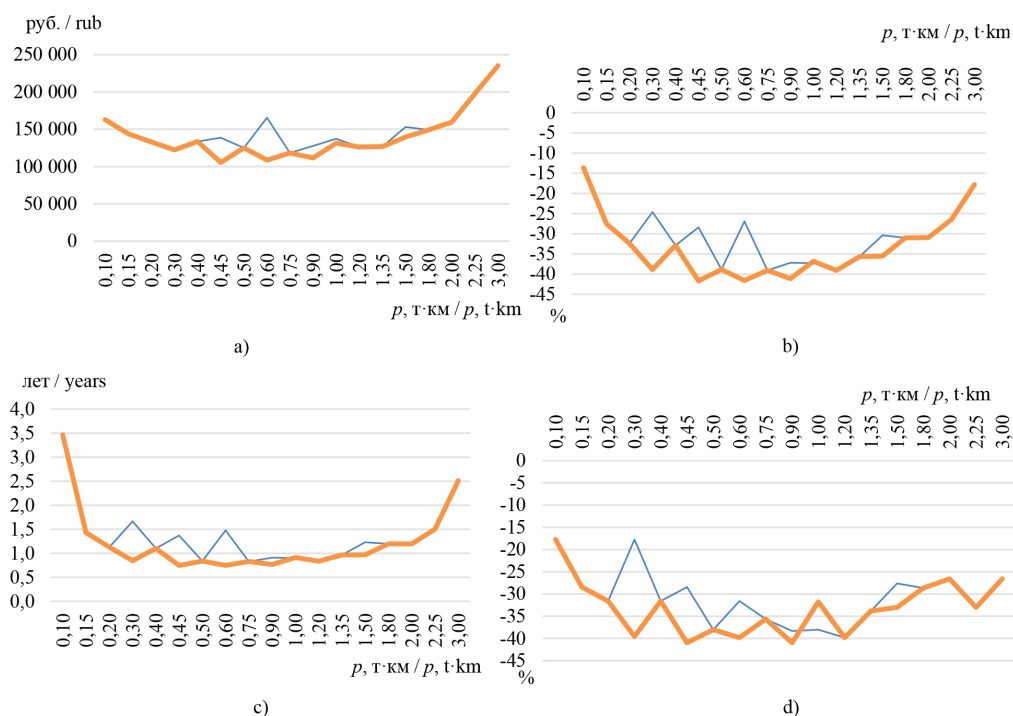
Приведенные исходные данные были использованы для оценки технико-экономической эффективности применения многофункциональных контейнеров в первичном семеноводстве зерновых культур в сравнении с мешкотарой в соответствии с ГОСТ 34393-2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки»¹².

Результаты исследования

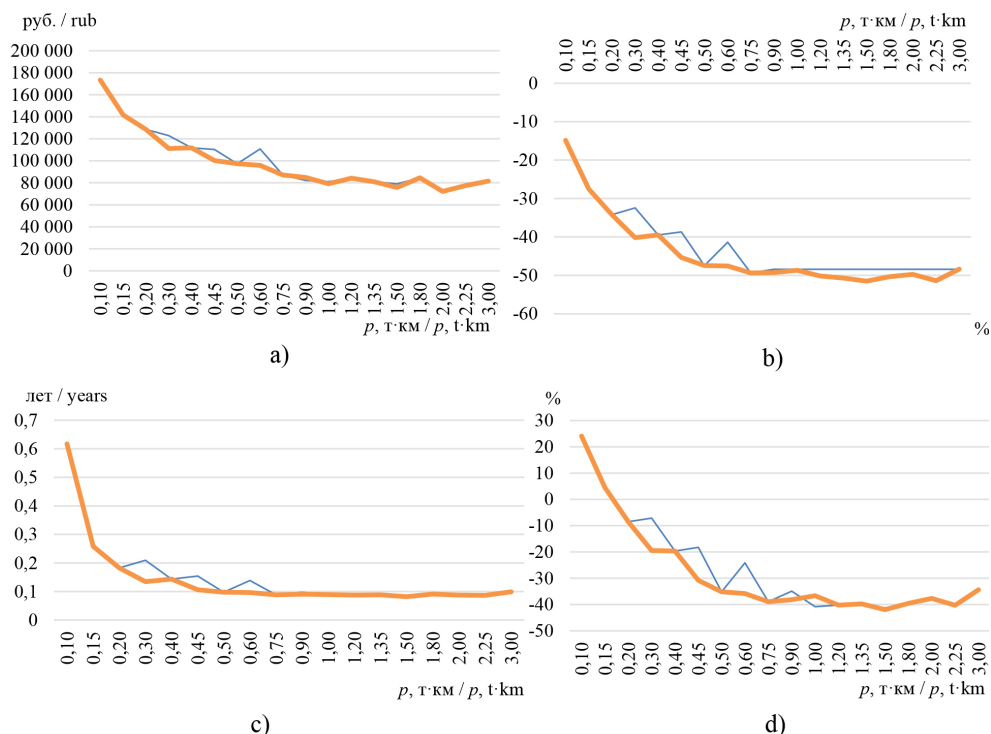
Рассмотрим графики изменения показателей сравнительной экономической эффективности на технологических операциях уборки и транспортировки в зависимости от удельного грузооборота (рис. 10–12). При этом контуры графиков соответствуют контурам графиков изменения производительности принятой в расчет техники и сушки семян в зависимости от начальной влажности семян. На рисунках 10 а, 11 а, 12 а представлены графики изменения экономии совокупных денежных средств на годовой фактический объем на технологической операции уборки, транспортировки и сушки. На рисунках

¹² ГОСТ 34393-2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки : дата введения 2019-09-01.

10 б, 11 б, 12 б (штрихпунктирная линия) представлены графики изменения снижения себестоимости выполнения работы на годовой условный объем 400,7 т на технологической операции уборки, транспортировки и 20–130 т на операции сушки. На рисунках 10 с, 11 с, 12 с представлены графики изменения сроков окупаемости капиталовложений на годовой условный объем 400,7 т на технологической операции уборки, транспортировки и 20–130 т на операции сушки. На рисунке 12 (б, штриховая линия) представлен график изменения снижения потребности в обслуживающем персонале на технологической операции сушки. На операции уборки снижение потребности в обслуживающем персонале отсутствует, на операции транспортировки оно постоянно и равно 66 %, а на операции сушки – 33 %. На рисунках 10 d, 11 d, 12 b (сплошная линия) представлены графики изменения снижения потребности в источниках энергии на годовой условный объем 400,7 т на технологической операции уборки, транспортировки и 20–130 т на операции сушки.



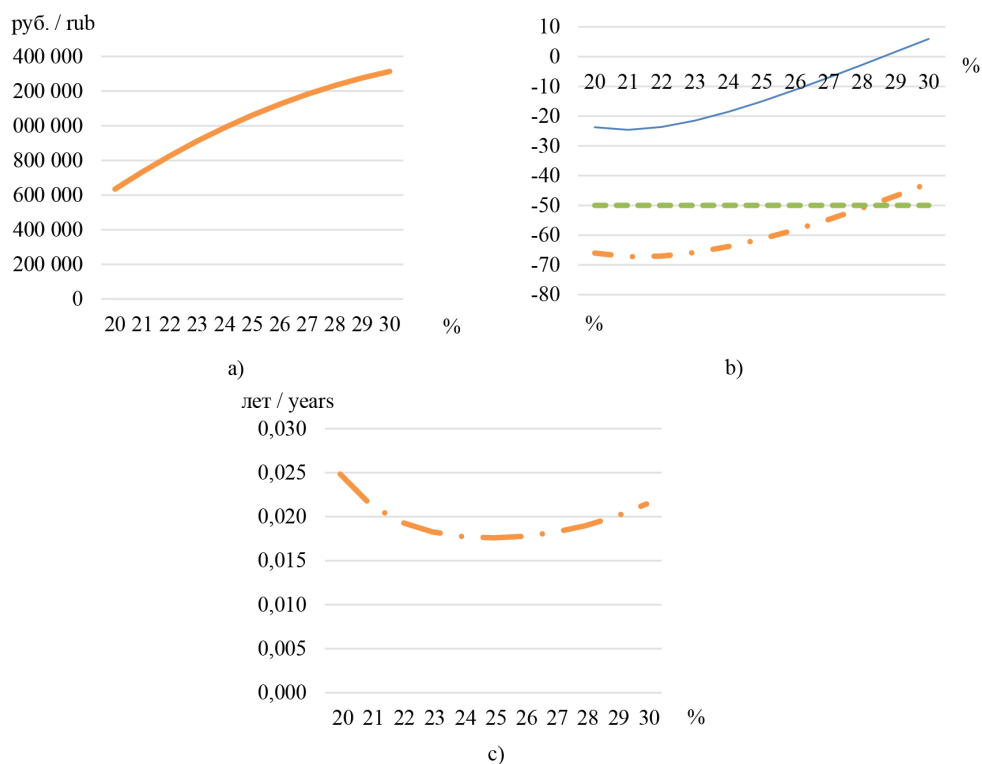
Р и с. 10. Показатели сравнительной экономической эффективности применения многофункционального контейнера в сравнении с мешкотарой при уборке селекционно-семеноводческим комбайном Wintersteiger Delta
 F i g. 10. Indicators of comparative economic efficiency of using a multifunctional container in comparison with sacks during harvesting by the Wintersteiger Delta plot combine



Р и с. 11. Показатели сравнительной экономической эффективности применения многофункционального контейнера в сравнении с мешкотарой при перевозке транспортным средством «Беларус-622» с полуприцепом 1ПТС-2

Fig. 11. Indicators of the comparative economic efficiency of using a multifunctional container in a comparison with sacks when transporting by Belarus 622 tractor with 1PTS-2 semi-trailer

Согласно графикам (рис. 7, 8, 10, 11, 12), при годовом условном объеме работ 400,7 т экономия совокупных затрат денежных средств для селекционно-семеноводческого комбайна при использовании многофункционального контейнера в зависимости от удельного грузооборота составляет в среднем 117,9 тыс. руб., снижение себестоимости выполнения работы – 32,8 %, срок окупаемости – 2 года, снижение потребности в обслуживающем персонале не выявлено, источниках энергии – 32,3 %, снижение потребности в комбайнах не выявлено. Экономия совокупных затрат денежных средств для транспортного средства при использовании многофункционального контейнера в зависимости от удельного грузооборота составляет в среднем 67,6 тыс. руб., снижение себестоимости выполнения работы – 49,5 %, срок окупаемости – 0,2 года, снижение потребности в обслуживающем персонале – 66 % и источниках энергии – 27,5 %, снижение потребности в транспортных средствах – 41,6 %; экономия совокупных затрат денежных средств для зерносушилки с применением многофункционального контейнера при годовом условном объеме работ 20–130 т в зависимости от начальной влажности семян составляет в среднем 306,5 тыс. руб., снижение себестоимости выполнения работы – 46,2 %, срок окупаемости – 0,8 года, снижение потребности в обслуживающем персонале – 33,3 % и источниках энергии – 12,8 % снижение потребности в зерносушилках – 20,5 %.



Р и с. 12. Показатели сравнительной экономической эффективности конвективной сушки зерносушилкой на базе зерносушилки лотковой СЛ-0,3х2 с применением реверсируемого многофункционального контейнера в сравнении с сушкой в стационарном слое с применением мешкотары

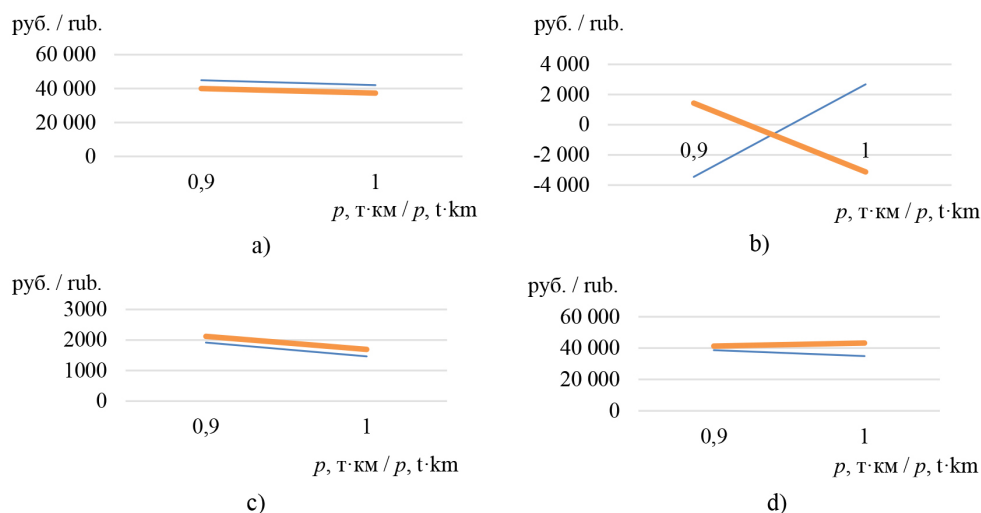
F i g. 12. Indicators of comparative economic efficiency of convective drying by grain dryer on the basis of the SL-0,3x2 grain dryer tray with the use of reversible multifunctional container in comparison with drying in a stationary layer with bagging

Графики рисунков 10–12 указывают на то, что рост производительности принятой в расчет уборочно-транспортной техники повышает годовой фактический объем единицы техники и, соответственно, затраты на единицу техники.

Обсуждение и заключение

Удалось выяснить, что снижается себестоимость выполнения работы на годовой условный объем работ, срок окупаемости капиталовложений и потребность в источниках энергии, однако, изменение экономии затрат может не являться прямо пропорциональным изменению производительности. При удельном грузообороте $p = 1$ тк·м экономия затрат при меньшей производительности превышает экономию затрат при большей производительности, хотя разница становится менее заметной по мере обобщения показателей экономической эффективности: от экономии затрат на единицу техники до срока окупаемости капиталовложений. Это может быть связано с тем, что прирост производительности уборочно-транспортной техники от перехода к многофункциональному контейнеру в условиях показателей удельного грузооборота, обеспечивающих меньшую эксплуатационную производительность,

выше по сравнению с условиями показателей удельного грузооборота при большей эксплуатационной производительности. Однако и в этом случае многое зависит от отдельных показателей, из которых составляется сравнительная экономическая эффективность. Например, экономия затрат на оплату труда при транспортировке на годовой фактический объем, которая зависит от изменения производительности транспортного средства, куда входит паллетоместо на 8 мешков или многофункциональный контейнер, при $p = 0,9 - 1$ т·км изменяются, что показано на рисунке 13 а. Экономия затрат на горюче-смазочные материалы изменяется, что показано на рисунке 14 б, а экономия затрат от потерь семян изменяется так, как показано на рисунке 14 с. В свою очередь, экономия затрат на вспомогательные материалы на годовой фактический объем, которые не зависят от изменения производительности комбайна, изменяются так, как показано на рисунке 14 d. Изменения экономии затрат на ремонтно-обслуживающие работы и амортизацию на годовой фактический объем равны нулю. Контуры графиков соответствуют контурам графиков изменения производительности и экономии затрат принятой в расчет техники.

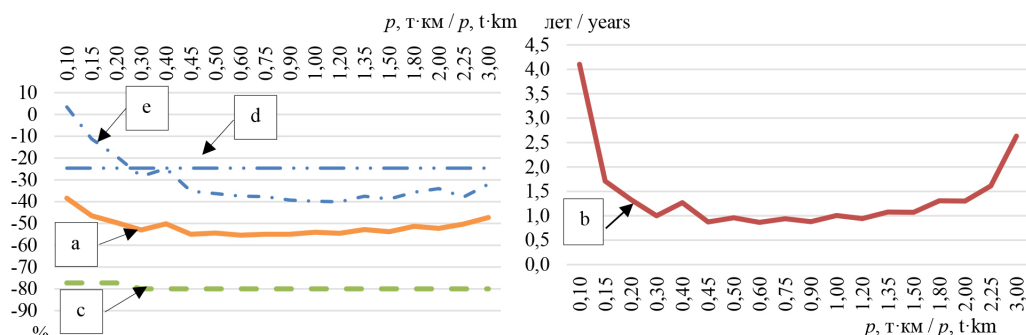


Р и с. 13. Фрагменты изменения экономии затрат на оплату труда (а), горюче-смазочные материалы (б), от потерь семян (с) и вспомогательные материалы (д) на годовой фактический объем работ транспортного средства «Беларус-622» с полуприцепом 1ПТС-2

Fig. 13. Fragments of changes in labor cost savings (a), fuels and lubricants (b), from seed losses (c), and support materials (d) on the annual actual volume of work of Belarus 622 tractor with IPTS-2 semi-trailer

Отмечено повышение потребности в моторном топливе на технологической операции транспортировки в диапазоне $p = 0,1 - 0,2$ т·км с применением многофункционального контейнера. Повышение может быть связано с меньшими пробегами ТС при подборе мешкотары в поле перемещением ТС методом прохождения ближайших точек и исключением простоев по сравнению с прямым взаимодействием комбайна и транспортного средства [19]. Отмечено повышение потребности в электроэнергии на технологической операции сушки в диапазоне начальной влажности семян 28–30 % с применением многофункционального контейнера, но обобщающий показатель себестоимости выполнения работы показывает снижение совокупных

затрат. Повышение может быть связано с циркуляцией некоторого количества влаги в слое, которое не успевает покинуть слой до очередного реверса контейнера, за счет чего увеличивается время сушки до кондиционной влажности. В совокупности наилучшие показатели обеспечиваются в производстве семян с применением многофункционального контейнера и с обслуживающей контейнер техникой с наибольшей эксплуатационной производительностью (исключением является диапазон $p = 0,9-1$ т·км, при котором наибольшая совокупная экономическая эффективность достигается с меньшей производительностью представленной техники) (рис. 14).



Р и с. 14. Графики изменения совокупного снижения себестоимости работ по уборке, транспортировке, сушке (а), срока окупаемости многофункционального контейнера (б), снижения потребности в обслуживающем персонале (с), топливе (д), электроэнергии (е)

F i g. 14. Graphs of changes in the cumulative reduction in the cost of harvesting, transporting, drying (а), the payback period for a multifunctional container (b), reducing the need for maintenance personnel (с), fuel (д), electricity (е)

Показатели удельного грузооборота рисунка 14 представлены в таблице 4, среди которых наибольшая экономическая эффективность за счет снижения себестоимости выполнения работ, снижения потребности в обслуживающем персонале, источниках энергии и технике обеспечена при $U_i = 800$ т/км²; $L_r = 0,15$ км; $b = 0,01$ км; $L_{п-т} = 0,5$ км, начальной влажности семян 21 % ($p = 0,6$ т·км).

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Показатели удельного грузооборота U_p , L_r , b , $L_{п-т}$ обеспечивающие наибольшую экономическую эффективность с применением многофункционального контейнера
Indicators of specific cargo turnover U_p , L_r , b , $L_{п-т}$ that provide the greatest economic efficiency with the use of a multifunctional container

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
p	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,9	1	1,2	1,35	1,5	1,8	2	2,25	3
U_i	400	600	800	400	800	600	400	800	600	600	400	800	600	600	800	800	600	800
L_r	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	0,25	0,15	0,25	0,15	0,25	0,15	0,15	0,25	0,15	0,25	0,25	0,25
b	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$L_{п-т}$	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1,5	1	1,5	1	1,5	1,5

Также в таблице 4 курсивом отмечены показатели удельного грузооборота $p = 1$ т·км, при которых меньшая в данных условиях производительность техники обеспечивает большую экономическую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытания системы мониторинга сменных кузовов / А. А. Артюшин [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 4. С. 21–24. EDN: [TZJBXR](#)
2. Латышенок Н. М. Перспективы применения электронного блока управления аэрацией зерна в контейнерах с регулируемой газовой средой // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2021. Т. 13, № 2. С. 95–102. EDN: [TNGYPT](#)
3. Измайлов А. Ю., Евтюшенков Н. Е. Эффективность новых транспортных технологий в АПК // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. № 2. С. 32–37. EDN: [KDNDIH](#)
4. Инновационный подход в развитии транспортной инфраструктуры агропромышленного комплекса / А. Ю. Измайлов [и др.] // Технология колесных и гусеничных машин. 2012. № 1. С. 23–28. EDN: [OZPYZV](#)
5. Чулков А. С. Эффективность уборки зерновых культур с применением сменных кузовов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 4. С. 24–25. EDN: [QZKYPT](#)
6. К вопросу создания базы данных транспортных и погрузочных средств / А. Ю. Измайлов [и др.] // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России. 2013. С. 263–265. EDN: [TUFZQT](#)
7. Евтюшенков Н. Е., Чулков А. С. Транспортное обслуживание уборочных машин сменными кузовами // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 5. С. 35–37. EDN: [OHSAAZ](#)
8. Чулков А. С. Преимущество перевалочной технологии с применением сменных кузовов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 5. С. 42–43. EDN: [RBTNBN](#)
9. Заготовка семян зерновых и зернобобовых культур в селекции и первичном семеноводстве / В. П. Елизаров [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 5. С. 17–21. EDN: [TCGGND](#)
10. Исследование кинетики сушки вороха семян в контейнерной сушилке / А. Ю. Измайлов [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 5. С. 65–67. EDN: [SNVTDF](#)
11. Prentice B., Hemmes M. Containerization of Grain: Emergence of a New Supply Chain Market. Journal of Transportation Technologies. 2015. Issue 5. P. 55–68. <https://doi.org/10.4236/jtts.2015.52006>
12. Измайлов А. Ю., Евтюшенков Н. Е., Рожин В. Ф. Разработка математического аппарата для моделирования технологий по транспортированию селекционного урожая // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2015. № 6. С. 14–16. EDN: [UOSUON](#)
13. Effects of Container and Duration of Storage on the Quality of Okra (*Abelmoschus esculentus*) Seeds / R. Sultana [et al.] // The Agriculturists. 2016. Vol. 14, Issue 1. P. 63–72. <https://doi.org/10.3329/agric.v14i1.29101>
14. Измайлов А. Ю., Евтюшенков Н. Е., Курбанов Р. К. Модернизация технологий транспортирования селекционного урожая // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2017. № 2. С. 6–8. EDN: [YINOQT](#)
15. Обоснование уборочно-транспортных процессов в селекционных технологиях / А. Ю. Измайлов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 1. С. 4–9. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-4-9>
16. Результаты исследования образования конденсата влаги при аэрации зерновой массы, находящейся в герметичном контейнере с регулируемой воздушной средой / М. Б. Латышенок [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2020. № 3 (47). С. 109–112. EDN: [EJAJNY](#)
17. Исследование температурного и влажностного режима хранения семенного зерна в герметичной металлической емкости / Н. М. Латышенок [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2021. Т. 13, № 4. С. 152–158. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.47.31.019>
18. Степанов К. А., Иванов М. В. Технология контейнерной заготовки семян и зерна в семеноводстве // Аграрный научный журнал. 2021. № 4. С. 102–105. <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i4pp102-105>
19. Комбайн семенно-уборочный-2: патент 2001109656 Российская Федерация / Пестряков Л. А. № 2236110; заявл. 2001.04.10; опубл. 2003.05.10, Бюл. № 13. 5 с. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2001109656A_20030510
20. Контейнерная система для сбора зерна от бункерного комбайна: патент 2003122370 Российская Федерация / Бурьянов А. И., Дмитренко А. И., Пасечный Н. И. № 2003122370; заявл. 2003.07.17; опубл. 2005.02.10, Бюл. № 12. 5 с. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2003122370A_20050210



21. Способ сушки семян в контейнерах и устройство для его осуществления : патент 2013135593 Российская Федерация / Власова С. В. [и др.]. № 2558867 ; заявл. 2013.07.29 ; опубл. 2015.02.10, Бюл. № 6. 7 с. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2013135593A_20150210
22. Контейнерный способ уборки зерновых культур с селекционных делянок : патент 2013146225 Российская Федерация / Жалнин Э. В., Орехов А. П., Подзоров А. В. № 2534290 ; заявл. 2013.10.17 ; опубл. 2014.11.27, Бюл. № 13. 4 с. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2534290C1_20141127
23. Способ контейнерной перевозки, сушки и хранения семян : патент 2013108216 Российская Федерация / Измайлов А. Ю. [и др.]. № 2527520 ; заявл. 2013.02.25 ; опубл. 2014.08.27, Бюл. № 13. 5 с. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2013108216A_20140827
24. Способ контейнерной сушки семян и зерна и устройство для его осуществления : патент 2014117127 Российская Федерация / Крюков М. Л. [и др.]. № 2555239 ; заявл. 2014.04.29 ; опубл. 2015.07.10, Бюл. № 6. 9 с. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2555239C1_20150710
25. Способ и устройство для контейнерной сушки семян : патент 2014117127 Российская Федерация / Голубкович А. В. [и др.]. № 2589972 ; заявл. 2015.04.16 ; опубл. 2016.07.10, Бюл. № 6. 9 с. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2589972C1>
26. Контейнер для транспортировки, сушки и хранения семян : патент 2014117127 Российская Федерация / Измайлов А. Ю. [и др.]. № 2764947 ; заявл. 2021.07.13 ; опубл. 2022.01.24, Бюл. № 6. 17 с. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2764947C1_20220124
27. Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Динамика фракционного состава зерносоматической массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 249–262. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>
28. Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 403–416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
29. Жалнин Э. В., Зубина В. А. Обоснование типовых сельскохозяйственных территорий для разработки региональных систем машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 2. С. 82–89. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89>
30. Чаплыгин М. Е., Чулков А. С., Степанов К. А. Способы передвижения транспортного средства в поле при подборе груза // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 4 (49). С. 37–43. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-4-37-43>

*Поступила в редакцию 09.11.2023; поступила после рецензирования 06.12.2023;
принята к публикации 16.12.2023*

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

Степанов Кирилл Александрович, младший научный сотрудник, сотрудник лаборатории «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/0009-0004-1511-4307>, 89999878895@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М. Е. Чаплыгин – научное руководство, формулирование основных целей и задач исследования, доработка текста, формирование общих выводов.

К. А. Степанов – анализ литературных источников, составление начального варианта статьи, визуализация материалов, доработка текста, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Artyushin A.A., Evtyushenkov N.E., Shilova E.P., Grishin A.A. Testing of the Monitoring System for Replacement Bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015;(4):21–24. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **TZJBXR**
2. Latyshenok N.M. Prospects for the Use of an Electronic Control Unit for Grain Aeration in Sealed Containers with a Controlled air Environment. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2021;13(2):95–102. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **TNGYPT**
3. Izmajlov A.Yu., Evtyushenkov N.E. Efficiency of New Transport Technologies in the Agro-Industrial Complex. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2009;(2):32–37. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **KDNDIH**
4. Izmaylov A.Yu., Dzotsenidze T.D., Evtyushenkov N.E., Levshin A.G., Galkin S.N., Sorokin V.G., et al. Innovative Approach in Development of Agricultural Transport Infrastructure. *Technology of Wheeled and Tracked Machines*. 2012;1:23–28. EDN: **OZPYZV**
5. Chulkov A.S. Efficiency of Harvesting Grain Crops with the Use of Replaceable Bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013;(4):24–25. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **QZKYPT**
6. Izmailov A.Yu., Evtyushenkov N.E., Kurbanov R.K., Shilova E.P. On the Issue of Creating a Database of Transport and Loading Equipment. *System of Technologies and Machines for Innovative Development of Agricultural Industry of Russia*. 2013;263–265. EDN: **TUFZQT**
7. Evtyushenkov N.E., Chulkov A.S. Transport Service of Harvesting Machines with Replacement Bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011;(5):35–37. EDN: **OHSAAZ**
8. Chulkov A.S. The Advantage of Transshipment Technology with the Use of Replaceable Bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013;(5):42–43. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **RBTNBN**
9. Yelizarov V.P., Golubkovich A.V., Evtyushenkov N.E., Kryukov M.L., Kalinkin G.A. Harvesting of Grain and Grain Legume Seeds in Selection and Primary Seed Breeding. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;(5):17–21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **TCGGND**
10. Izmailov A.Yu., Golubkovich A.V., Evtyushenkov N.Ye., Kryukov M.L., Razin O.A. Study of the Drying Kinetics of a Pile of Seeds in the Container Dryer. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2014;(5):65–67. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **SNVTDF**
11. Prentice B., Hemmes M. Containerization of Grain: Emergence of a New Supply Chain Market. *Journal of Transportation Technologies*. 2015;(5):55–68. <https://doi.org/10.4236/jtts.2015.52006>
12. Izmajlov A.Yu., Evtyushenkov N.E., Rozhin V.F. Elaboration of Mathematical Device for Modeling Technologies for Transportation of Selective Yield. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2015;(6):14–16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **UOSUON**
13. Sultana R., Chowdhury M. S.M., Rafiqul Islam M., Akhter K. Effects of Container and Duration of Storage on the Quality of Okra (*Abelmoschus Esculentus*) Seeds. *The Agriculturists*. 2016;14(1):63–72. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.3329/agric.v14i1.29101>
14. Izmajlov A.Yu., Evtyushenkov N.E., Kurbanov R.K. Modernization of Selected Yield Conveying Technology. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2017;(2):6–8. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **INOQT**
15. Izmailov A.Yu., Rozhin V.F., Shilova E.P., Ivanov M.V., Kynev D.N. Substantiation of Harvesting and Transportation Processes in Selection Technologies. *Agricultural Machines and Technologies*. 2018;12(1):4–9. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-1-4-9>
16. Latyshenok M.B., Kostenko M.Y., Latyshenok N.M., Kostenko N.A. Results of the Study of the Formation of Moisture Condensate During Aeration of Grain Mass in a Sealed Container with a Regulated air Medium. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2021;13(2):95–102. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **EJAJNY**
17. Latyshenok N.M., Shemyakin A.V., Slobodskova A.A., Gasparyan S.V., Tsymbal A.A., Musaev F.A. Investigation of the Temperature and Humidity of Grain Storage in a Sealed Metal Container. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2021;13(4):152–158. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.47.31.019>
18. Stepanov K.A., Ivanov M.V. Technology of Container Logging of Seeds and Grain in Seed Production. *The Agrarian Scientific Journal*. 2021;(4):102–105. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i4pp102-105>

19. Pestryakov L.A. [Seed Harvester-2]. Patent 2,236,110 Russian Federation. 2003 May 10. 5 p. (In Russ.)
20. Bur'yanov A.I., Dmitrenko A.I., Pasechnyj N.I. [Container System for Collecting Grain from a Bunker Combine]. Patent 2,003,122,370 Russian Federation. 2005 February 10. 5 p. (In Russ.)
21. Vlasova S.V., Elizarov V.P., Kalinkin G.A., et al. [The Method of Drying Seeds in Containers and the Device for its Implementation]. Patent 2,558,867 Russian Federation. 2015 February 10. 7 p. (In Russ.)
22. Zhalnin E.V., Orekhov A.P., Podzorov A.V. [Container Method of Harvesting Grain Crops from Breeding Plots]. Patent 2,534,290 Russian Federation. 2014 November 27. 4 p. (In Russ.)
23. Izmajlov A.Yu., Elizarov V.P., Evtyushenkov N.E., et al. [Method of Container Transportation, Drying and Storage of Seeds]. Patent 2,527,520 Russian Federation. 2014 August 27. 5 p. (In Russ.)
24. Kryukov M.L., Golubkovich A.V., Evtyushenkov N.E., et al. [A Method for Container Drying of Seeds and Grains and a Device for its Implementation]. Patent 2,555,239 Russian Federation. 2015 July 10. 9 p. (In Russ.)
25. Golubkovich A.V., Izmailov A.Yu., Evtyushenkov N.E., et al. [Method and Device for Container Drying of Seeds]. Patent 2,589,972 Russian Federation. 2016 July 10. 9 p. (In Russ.)
26. Izmajlov A.Yu., Kryukov M.L., Ivanov M.V., et al. [Container for Transportation, Drying and Storage of Seeds]. Patent 2,764,947 Russian Federation. 2022 January 24. 17 p. (In Russ.)
27. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Dynamics of Fractional Composition of Grain-and-Straw Mass Being Threshed in the Threshing Mechanism of a Combine Harvester. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):249–262. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>
28. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the Design of Combine Harvesters by Harmonizing Their Basic Technical Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):403–416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
29. Zhalnin E.V., Zubina V.A. Substantiation of Typical Agricultural Areas As a Methodological Basis for the Development of Regional Machine Systems. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(2):82–89. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-2-82-89>
30. Chaplygin M.E., Chulkov A.S., Stepanov K.A. Movement of the Vehicle in the Field When Picking up Cargo. *Electrification of Agriculture*. 2022;69(4):37–43. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-4-37-43>

Submitted 09.11.2023; revised 06.12.2023; accepted 16.12.2023

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](https://orcid.org/AAZ-6056-2020), misha2728@yandex.ru

Kirill A. Stepanov, Junior Researcher, employee 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/0009-0004-1511-4307>, 89999878895@mail.ru

Authors contribution:

M. E. Chaplygin – scientific guidance, formulation of the main goals and objectives of the study, revision of the text, drawing general conclusions.

K. A. Stepanov – analysis of literary sources, writing the initial draft, drawing general conclusions, visualization of research results, revision of the text, final revision of the manuscript.

All authors have read and approved the final manuscript.

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.348:632.934.1

doi: [10.15507/2658-4123.034.202401.072-087](https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.072-087)

Оригинальная статья



Оптимизация параметров адаптивного распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя

И. И. Гуреев¹✉, Б. Н. Нуралин², М. У. Мухтаров²,
О. Н. Костюченкова³

¹ Курский федеральный аграрный научный центр
(г. Курск, Российская Федерация)

² Западно-Казахстанский аграрно-технический
университет имени Жангир хана
(г. Уральск, Республика Казахстан)

³ Казахский агротехнический исследовательский университет
имени Сакена Сейфуллина (г. Астана, Республика Казахстан)

✉ gureev06@mail.ru

Аннотация

Введение. При выращивании высокорослых сельскохозяйственных культур (зерновых на поздних фазах развития, кукурузы, подсолнечника и др.) используют штанговые опрыскиватели, оснащенные двухфакельными распылителями с неизменяемыми углами наклона к вертикали факелов распыла. Рабочая жидкость такими распылителями более интенсивно наносится на набегающую сторону листьев растений, а интенсивность покрытия рабочей жидкостью растений с тыльной стороны снижается. Повысить качество обработки культур штанговыми опрыскивателями позволит усовершенствование их распылителей.

Цель исследования. Экспериментальное определение алгоритма изменения углов наклона факелов распыла двухфакельного распылителя, обеспечивающего одинаковую интенсивность нанесения рабочей жидкости на листья высокорослых растений.

Материалы и методы. Исследования проводили на стенде, нанося подкрашенную воду на набегающую и тыльную стороны макета высокорослого растения, движущегося с задаваемой скоростью. Эксперимент выполняли по методике оптимального планирования. В качестве параметра оптимизации приняли разницу между содержанием следов капель на набегающей и тыльной сторонах макета. Варьируемыми факторами были углы наклона факелов распыла и рабочая скорость опрыскивателя. **Результаты исследования.** Алгоритм изменения оптимальных значений углов наклона факелов распыла в зависимости от скорости опрыскивателя определили, исходя из равенства нулю первой производной параметра оптимизации по значению этих углов.

© Гуреев И. И., Нуралин Б. Н., Мухтаров М. У., Костюченкова О. Н., 2024



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

Обсуждение и заключение. Согласно алгоритму, с увеличением рабочей скорости опрыскивателя с 1,2 до 3,2 м/с оптимальный угол наклона к вертикали переднего факела линейно изменяется от 25 до 21°, а заднего – от 46,7 до 57°. Наличие алгоритма позволит обосновать техническое задание на создание процессора для автоматического управления углами наклона факелов распыла при работе опрыскивателя.

Ключевые слова: высокорослое растение, полевой опрыскиватель, адаптивный распылитель, форсунка, факел распыла

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в Курском федеральном аграрном научном центре в рамках государственного задания № FGZU-2022-0005 и в Западно-Казахстанском аграрно-техническом университете имени Жангир хана в рамках плана НИОКР на 2020–2025 гг. «Ресурсосберегающие технологии и технические средства возделывания и уборки сельскохозяйственных культур в условиях Западного Казахстана».

Для цитирования: Оптимизация параметров адаптивного распылителя сельскохозяйственного опрыскивателя / И. И. Гуреев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 72–87. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.072-087>

Original article

Optimization of Parameters of Adaptive Spray System for Agricultural Sprayer

I. I. Gureev^a✉, B. N. Nuralin^b, M. U. Mukhtarov^b,
O. N. Kostyuchenkova^c

^a Federal Agricultural Kursk Research Center
(Kursk, Russian Federation)

^b Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University
(Uralsk, Republic of Kazakhstan)

^c S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University
(Astana, Republic of Kazakhstan)

✉ gureev06@mail.ru

Abstract

Introduction. When growing tall-growth crops (cereal crops in late the phases of development, corn, sunflower, etc.), there are used boom sprayers equipped with twin-fluid spray cones with fixed angles of inclination to the vertical of the spray cones. The working fluid is applied with such sprays are more intensively on the front side of the plant leaves while the intensity of covering the plants from the back side with the working fluid decreases. The development of the spray system will allow improving the quality of crop treatment with boom sprayers.

Aim of the Study. The aim of the research is to determine experimentally the algorithm for changing the angles of inclination of a twin-fluid spray cone that provides the same intensity of applying working liquid to the leaves of high-growth plants.

Materials and Methods. The research was carried out on a test bench by applying colored water to the front and rear sides of a tall-growth plant model moving at a specified speed. The experiment was carried out according to the method of optimal planning. The difference between the content of droplets on the front and rear sides of the tall-growth plant model was taken as an optimization parameter. Variable factors were the spray cone inclination angles and the operating speed of the sprayer.

Results. The algorithm for changing the optimum values of the spray cone inclination angles depending on the sprayer speed was determined based on the equality of the first derivative of the optimization to zero parameter by the value of these angles.

Discussion and Conclusion. According to the algorithm, when the sprayer operating speed increases from 1.2 to 3.2 m/s, the optimal angle of inclination to the front spray cone vertical changes linearly from 25 to 21 degrees, and the rear one – from 46.7 to 57 degrees. This algorithm will allow justifying the technical specifications to develop a processor for automatic control of the spray cone inclination angles cones when the sprayer is operating.

Keywords: high-growth plant, field sprayer, adaptive spray system, nozzle, spray cone

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

Funding: The research was carried out in the Federal Agricultural Kursk Research Center under the state assignment No. FGZU-2022-0005 and at the Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University under the R&D plan for 2020–2025 “Resource-saving technologies and technical means of cultivation and harvesting of agricultural crops in Western Kazakhstan”.

For citation: Gureev I.I., Nuralin B.N., Mukhtarov M.U., Kostyuchenkova O.N. Optimization of Parameters of Adaptive Spray System for Agricultural Sprayer. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):72–87. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.072-087>

Введение

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), ущерб от совокупного воздействия вредных организмов на сельскохозяйственные культуры составляет от 25 до 40 %. Без применения химических средств защиты растений (пестицидов) мировые потери урожая увеличились бы наполовину, а цены на продовольственную продукцию выросли бы в 2–3 раза. В Российской Федерации потенциальные потери урожая от вредных организмов в среднем составляют 25,7 % [1]. Положительные последствия применения пестицидов сказываются и на производимых семенах, которые обладают повышенной энергией прорастания и всхожестью [2]. Поэтому использование пестицидов является перспективным направлением современного мирового и отечественного земледелия [3].

Однако широкий спектр средств химической защиты сельскохозяйственных культур при возможном нарушении регламента использования приводит к загрязнению окружающей среды, что оказывает экотоксикологическое воздействие на живые организмы [4]. Вероятность экологических проблем достаточно велика, так как в производстве продуктов питания применяется более 60 тыс. химических реагентов, в составе которых находится 90 % вредных веществ [5]. Установлено развитие тяжелых респираторных заболеваний у обслуживающего персонала вследствие нарушения регламента использования пестицидов¹ [6].

На вегетирующие растения средства защиты наносят преимущественно с помощью опрыскивания, применяя штанговые опрыскиватели с рабочими органами в виде плоскофакельных распылителей с форсунками, формирующими факелы распыла рабочей жидкости. Задача опрыскивания состоит в нормированном дозировании растворов рабочей жидкости и равномерном распределении ее по

¹ Андреева Д. С. Характеристика рисков при работе с пестицидами // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета : сб. науч. тр. Барнаул : РИО Алтайского ГАУ, 2020. № 1. С. 54–58.

поверхности растений. Отклонение от этих требований является причиной перерасхода препаратов, повышения затрат на обработку посевов и негативных последствий воздействия на окружающую среду [7; 8].

Надлежащее исполнение технологического процесса в большей степени зависит от совершенства конструкции распылителей, обеспечивающих соблюдение требуемой равномерности нанесения препаратов на обрабатываемую поверхность и точность дозировок [3; 9]. Ключевой проблемой является ограниченный срок службы распылителей. Их форсунки в процессе работы изнашиваются и подлежат своевременной замене. При использовании изношенных форсунок превышение нормы расхода рабочей жидкости достигает 30–60 % [10].

Цель исследования – экспериментальное определение алгоритма изменения углов наклона к вертикали факелов распыла адаптивного двухфакельного распылителя в зависимости от скорости перемещения опрыскивателя, обеспечивающего одинаковую интенсивность нанесения рабочей жидкости на набегающую и тыльную стороны листьев высокорослых растений по ходу движения опрыскивающего агрегата. Это позволит обосновать техническое задание на создание процессора для автоматического управления углами наклона факелов распыла при работе опрыскивателя.

Обзор литературы

Современные конструкции опрыскивателей оснащают распылителями зарубежного производства (Lechler, Lurmark, Tee Jet, Agrotop, Nozal, Albuz и др.)² [11]. Качество нанесения рабочей жидкости на растения определяется размером капель, образуемых распылителями [12]. Большое значение имеет способность капель противостоять потерям препаратов от неконтролируемого сноса ветром, напрямую зависимо от массы капель рабочей жидкости [13]. Для удовлетворения большинства потребностей при опрыскивании посевов наиболее актуальны компактные плоскофакельные инжекторные распылители поколения IDK, формирующие тяжелые жидкостно-воздушные капли, менее подверженные сносу ветром [14; 15]. При соприкосновении с листьями растений такие капли под действием содержащихся в них пузырьков воздуха дробятся и более равномерно покрывают обрабатываемую поверхность.

Распылители полевых опрыскивателей производят однофакельными и двухфакельными. Качество нанесения рабочей жидкости однофакельными распылителями на растения высокорослых культур (зерновые на поздних фазах развития, кукурузу, подсолнечник и др.) существенно зависит от рабочей скорости опрыскивателя.

В продольно-вертикальной плоскости вектор относительной скорости капель, истекающих из форсунки однофакельного распылителя, направлен вертикально вниз. За счет горизонтальной переносной скорости опрыскивателя вектор абсолютной скорости капель отклоняется от вертикали вперед по ходу движения опрыскивателя и капли более интенсивно осаждаются на растениях с набегающей стороны. Соответственно, степень покрытия каплями тыльной стороны понижается³. С увеличением скорости опрыскивателя разность между интенсивностью

² Тхагапсова А. Р., Маршенов Р. Х., Хажметов Л. М. Анализ способов опрыскивания и типов распылителей // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты : сб. науч. тр. Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. (04–05 февраля 2021 г.). Нальчик : ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021. С. 140–143.

³ Гуреев И. И. Как настроить полевой опрыскиватель? М. : АМА-ПРЕСС, 2013. 54 с.

нанесения рабочей жидкости на набегающую и тыльную стороны растений возрастает. Следствием этого являются ухудшение качества опрыскивания растений и существенные экономико-экологические издержки [16].

Лучшие показатели качества опрыскивания обеспечивают двухфакельные распылители, оснащенные двумя форсунками, направленными вперед и назад по ходу рабочего перемещения опрыскивающего агрегата. Наклон факелов распыла к вертикали в продольно-вертикальной плоскости может быть симметричным. Например, у распылителей TFA, TFLD, TFS (Италия) для переднего и заднего факелов угол наклона составляет 30° .

Но более эффективными являются двухфакельные распылители с ассиметричным расположением факелов распыла. У распылителя TurboDrop[®] немецкого производства передний факел наклонен к вертикали вперед под углом 10° , а задний – назад под углом 50° . При рабочем перемещении опрыскивателя за счет его скорости наклон к вертикали вектора абсолютной скорости капель для передней форсунки возрастает, а для задней – уменьшается. На оптимальной скорости перемещения опрыскивателя эти углы выравниваются, и рабочая жидкость с одинаковой интенсивностью наносится на растения как с набегающей, так и с тыльной стороны⁴. Таким образом, для двухфакельного распылителя существует единственное оптимальное значение рабочей скорости опрыскивателя, соответствующее равномерному распределению рабочей жидкости на листьях высокорослых растений.

Также предложено углы наклона факелов распыла двухфакельной форсунки определять расчетным путем с учетом рабочей скорости опрыскивателя, скорости истечения капель рабочей жидкости из передней и задней форсунок, скорости и направления ветра. Расчетные значения обозначенных параметров рекомендуется откладывать на шкалах измерений и фиксировать [17].

Но в практических условиях наличие переменных уклонов на обрабатываемых полях не позволяет опрыскивающим агрегатам работать с неизменной рабочей скоростью [18]. Кроме того, скорость поступательного перемещения распылителей изменяется по ширине захвата штанги опрыскивателя при перемещении агрегата по криволинейным участкам поля, что также сказывается на качестве нанесения рабочей жидкости на растения⁵ [19]. Следовательно, для каждого значения переменной скорости движения агрегата должны быть свои оптимальные углы наклона к вертикали факелов распыла.

Ручная перенастройка распылителей на оптимальный режим в процессе выполнения полевых работ со средствами защиты растений увеличивает затраты и себестоимость производимой продукции, а самое главное – создает предпосылки угрозы здоровью обслуживающего персонала от возможного непосредственного контакта с ядохимикатами.

Поэтому предложена конструкция адаптивного двухфакельного распылителя, предполагающая автоматически изменяемый поворот факелов распыла в продольно-вертикальной плоскости в зависимости от рабочей скорости опрыскивающего агрегата [20; 21].

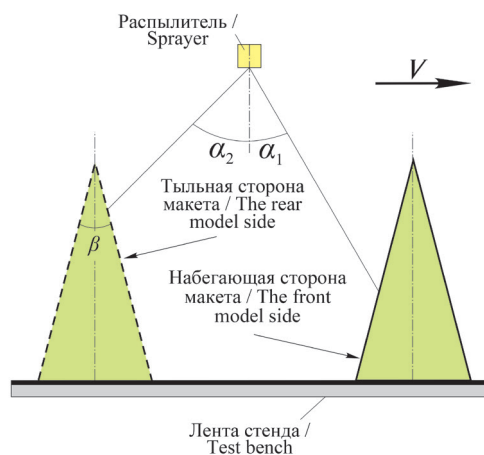
⁴ Гуреев И. И. Как настроить полевой опрыскиватель?

⁵ Москвин О. Н. Повышение эффективности процесса опрыскивания регулированием расхода пестицидов // Успехи молодежной науки в агропромышленном комплексе : сб. тр. LVII студен. науч.-практ. конф. Тюмень : ГАУ Северного Зауралья, 2022. С. 20–25.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводили в лаборатории севооборотов и адаптивных агротехнологий Курского федерального аграрного научного центра на стенде, позволяющем плавно изменять скорость опрыскивания, давление рабочей жидкости в нагнетательной магистрали и наклон осей факелов распыла адаптивного двухфакельного распылителя в продольно-вертикальной плоскости. Использовали опытный образец распылителя в виде блока двух широко распространенных компактных инжекторных плоскофакельных распылителей IDK калибра 03 (синие) со щелевыми форсунками⁶.

При проведении эксперимента на движущуюся с задаваемой скоростью V ленту стенда устанавливали усредненный макет высокорослого растения, фаза развития которого соответствует необходимости обработки пестицидами (рис. 1).



Р и с. 1. Схема стенда для проведения экспериментальных исследований
F i g. 1. Scheme of the test bench for experimental research

Абрис макета в продольно-вертикальной плоскости вписывался в равнобедренный треугольник высотой 0,52 м с углом при вершине $\beta = 19^\circ$. Над лентой на высоте 0,75 м устанавливали опытный образец адаптивного двухфакельного распылителя с возможностью изменения углов наклона к вертикали осей факелов распыла в продольно-вертикальной плоскости.

С набегающей (сплошные линии) и тыльной (штриховые линии) сторон макета крепили сменяемые листы белой бумаги формата A4, на которые распылителем наносили подкрашенную воду. По площади следов капель на бумаге оценивали степень покрытия рабочей жидкостью листьев с набегающей и тыльной сторон растений. Для этого следы капель сканировали и полученные изображения обрабатывали в программе Adobe Photoshop CC, которая отображала информацию по процентному содержанию площади следов капель на обрабатываемом изображении.

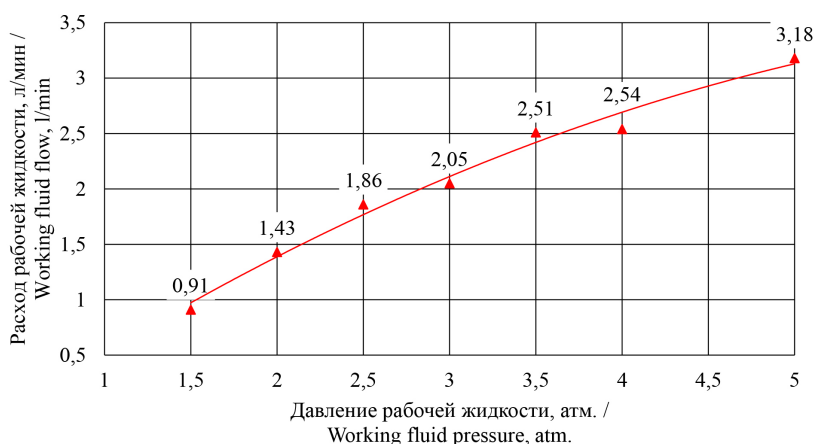
Соотношение между давлением рабочей жидкости и скоростью опрыскивания на всех вариантах испытаний поддерживалось исходя из постоянной дозы внесения

⁶ Гуреев И. И. Как настроить полевой опрыскиватель?

рабочей жидкости на уровне $Q = 250$ л/га. Такая доза наиболее распространена при внесении средств защиты растений в производстве сельскохозяйственных культур. Для поддержания постоянного значения Q (л/га) при изменении скорости опрыскивателя V (м/с) расход рабочего раствора через распылитель должен удовлетворять условию⁷:

$$q = 0,003QV, \text{ л/мин.} \quad (1)$$

Расход q изменяли давлением p рабочего раствора в нагнетательной магистрали. Взаимосвязь $q = q(p)$ установили экспериментальным тестированием исследуемого распылителя. Результаты тестирования представлены на рисунке 2.



Р и с. 2. Влияние давления рабочей жидкости на ее расход через распылитель
F i g. 2. The influence of working fluid pressure on its flow through the sprayer

Данные тестирования с достоверностью $R^2 = 0,99$ аппроксимировали уравнением второй степени $q = -0,072p^2 + 1,082p - 0,49$ решение которого относительно p имеет вид:

$$p = 7,51\sqrt{49,6 - 13,9q}, \text{ атм.} \quad (2)$$

В уравнение (2) подставили значение q из условия (1) и получили взаимосвязь давления рабочей жидкости со скоростью перемещения опрыскивателя:

$$p = 7,51\sqrt{49,6 - 10,4V}, \text{ атм.}$$

Эксперимент трехфакторный. Варьируемыми в исследовании факторами выступили углы наклона к вертикали осей факелов распыла распылителя в продольно-вертикальной плоскости: α_1 – переднего; α_2 – заднего. Режимным фактором явилась скорость перемещения V опрыскивателя. В качестве параметра оптимизации использовали разницу ΔY между содержанием площади следов капель на макете с набегающей и тыльной сторон.

⁷ Там же.

Процесс равномерного распределения рабочей жидкости опрыскивателем, перемежающимся по полю, достаточно сложный, и его невозможно описать линейной моделью вследствие ее неадекватности. Поэтому использовали более сложные нелинейные модели. Опытные данные получили по методике полного факторного планирования эксперимента в виде симметричного ортогонального центрально-композиционного плана, позволяющего представить результаты исследований в виде нелинейного уравнения регрессии второго порядка:

$$\Delta Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2, \% \quad (3)$$

где ΔY – параметр оптимизации; $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{33}$ – коэффициенты регрессии; X_1, X_2, X_3 – кодированные значения j -х факторов, $j = 1, 2, 3$.

Уровни и интервалы варьирования факторов устанавливали на основании априорной информации. Используя многочленный полином в качестве математической модели, j -е факторы кодировали по формуле:

$$X_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j}, \quad (4)$$

где X_j – кодовое значение фактора; x_j – натуральное текущее значение фактора; x_{j0} – нулевой уровень фактора; Δx_j – интервал варьирования фактора;

$$\Delta x_j = \frac{x_{j\max} - x_{j\min}}{2},$$

где $x_{j\max}, x_{j\min}$ – максимальное и минимальное значение j -го фактора.

Результаты исследования

После кодирования уровни факторов принимают значения -1 и $+1$, а в качестве нулевого уровня выступает центр интервала, в котором проводится эксперимент (табл. 1).

По данному плану выполнено $N = 15$ опытов в двукратной повторности ($r = 2$) (табл. 2).

Таблица 1

Table 1

Уровни и интервалы варьирования факторов
Levels and intervals of factor variation

Факторы / Factors	Обозначения / Designations		Уровни варьирования факторов / Levels of factor variation:				
	Кодовые / Code	Натуральные / Natural	Кодовые / Code				
			-1,215	-1,0	0	+1,0	+1,215
Натуральные / Natural							
Угол наклона переднего факела / Front spray cone inclination angle	X_1	α_1 , град. / α_1 , deg.	0	3	15	27	30
Угол наклона заднего факела / Rear spray cone inclination angle	X_2	α_2 , град. / α_2 , deg.	32	35	50	65	68
Рабочая скорость опрыскивателя / Sprayer operating speed	X_3	V , м/с / V , m/s	1,2	1,4	2,2	3,0	3,2

Таблица 2
Table 2

Матрица полного факторного эксперимента
Matrix of a full factorial experiment

№	Уровни факторов / Factor levels			Площадь следов капель с набегающей стороны макета, % / Area of drop traces on the front side of the model, %				Площадь следов капель с тыльной стороны макета, % / Area of drop traces on the rear side of the model, %				Экспериментальные значения параметра оптимизации ΔY , % Experimental values of the optimization parameter ΔY , %	Дисперсия параллельных опытов, $s^2(\Delta Y)$ / Variance of parallel experiments, $s^2(\Delta Y)$	Расчетные значения параметра оптимизации, ΔY , % Calculated values of the optimization parameter, ΔY , %	$(\Delta Y - \bar{\Delta Y})^2$
				Повторности / Repetition		Среднее / Average		Повторности / Repetition		Среднее / Average					
	X_1	X_2	X_3	1	2	1	2	1	2	1	2				
1	-1	1	1	11,9	12,5	12,2	12,2	6,8	7,2	7,0	7,0	5,2	0,50	5,19	0,00
2	-1	1	-1	23,0	21,4	22,2	22,2	26,0	24,8	25,4	25,4	-3,2	3,92	-0,49	7,34
3	-1	-1	1	13,5	10,5	12,0	12,0	9,0	7,8	8,4	8,4	3,6	8,82	3,23	0,14
4	-1	-1	-1	21,1	23,1	22,1	22,1	13,7	15,9	14,8	14,8	7,3	8,82	8,91	2,59
5	1	1	1	24,7	25,9	25,3	25,3	14,8	12,4	13,6	13,6	11,7	0,72	14,37	7,13
6	1	1	-1	22,5	20,7	21,6	21,6	13,4	12,4	12,9	12,9	8,7	3,92	8,69	0,00
7	1	-1	1	21,9	18,9	20,4	20,4	16,3	17,7	17,0	17,0	3,4	1,28	4,97	2,46
8	1	-1	-1	26,3	27,9	27,1	27,1	16,6	15,6	16,1	16,1	11	0,18	10,65	0,12
9	-1,215	0	0	13,0	11,6	12,3	12,3	14	14,8	14,4	14,4	-2,1	0,18	-2,02	0,01
10	+1,215	0	0	21,1	19,3	20,2	20,2	15,2	16,2	15,7	15,7	4,5	0,32	4,61	0,01
11	0	-1,215	0	17,2	18,8	18,0	18,0	6,4	7,0	6,7	6,7	11,3	2,42	11,08	0,05
12	0	+1,215	0	13,4	16,6	15,0	15,0	4,1	4,7	4,4	4,4	10,6	7,22	11,08	0,23
13	0	0	-1,215	20,8	18,4	19,6	19,6	17,2	16,6	16,9	16,9	2,7	4,50	4,07	1,88
14	0	0	+1,215	17,2	15,2	16,2	16,2	14,3	13,5	13,9	13,9	2,3	3,92	4,07	3,13
15	0	0	0	16,0	17,4	16,7	16,7	11,8	12,8	12,3	12,3	4,4	2,88	4,07	0,11
$s^2(\Delta Y) = 3,31$															25,21

Для наглядности на рисунке 3 показан вид следов капель с набегающей и тыльной сторон макета (вариант 6, табл. 2).

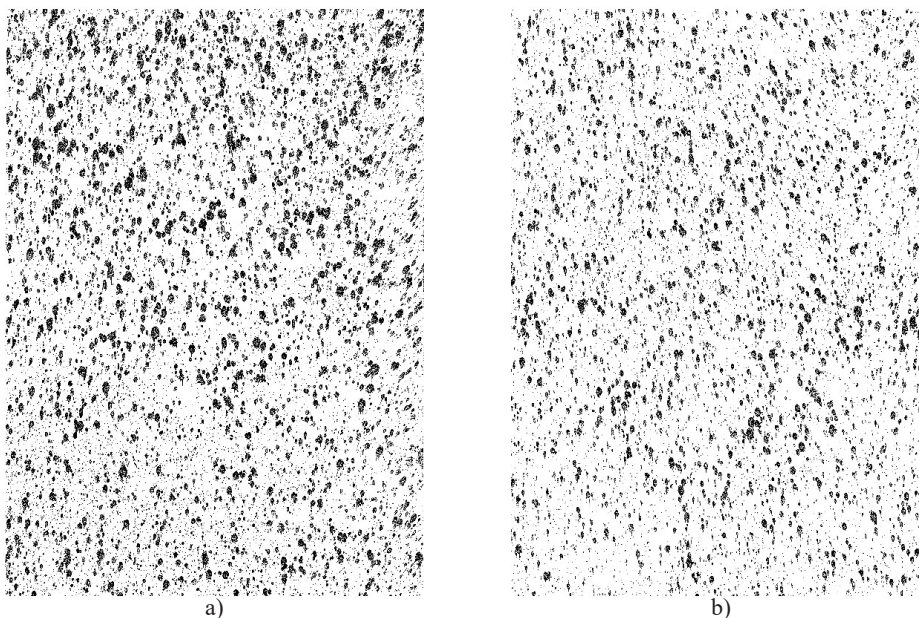


Рис. 3. Следы капель с набегающей (а) и тыльной (б) сторон макета

Fig. 3. Droplets on the front (a) and back (b) sides of the model

Систематические ошибки исключали повторением опытов в случайном порядке.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента составила $s^2(\Delta Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2 = 3,31$.

Проверку статистической значимости коэффициентов уравнения (3) проводили с помощью t -критерия Стьюдента. Критическое значение его ($t \geq 2,13$) выбирали по таблице⁸ для числа степеней свободы $N(r-1) = 15$ с уровнем значимости 0,05 (табл. 3).

После исключения незначимых коэффициентов получили уравнение регрессии:

$$\Delta Y = 4,07 + 2,73X_1 - 1,86X_1X_2 - 2,84X_2X_3 - 1,88X_1^2 + 4,75X_2^2, \% \quad (5)$$

Уравнение (5) проверили на адекватность, оценивая отклонения предсказываемых расчетных значений параметра оптимизации $\Delta \bar{Y}$ от экспериментальных ΔY для каждого из N опытов осуществляемого эксперимента, что позволило определить дисперсию адекватности для равного числа параллельных опытов по формуле:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{r}{N-k} \sum_{i=1}^N (\Delta Y - \Delta \bar{Y})^2 = \frac{2}{15-6} 25,21 = 5,6,$$

где k – число значимых коэффициентов уравнения регрессии, $k = 6$.

⁸ Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум) : учеб. пособие для технических вузов / В. П. Бородюк [и др.]. М. : Высшая школа, 1983. 216 с.

Т а б л и ц а 3

Table 3

Коэффициенты уравнения регрессии
Regression equation coefficients

Коэффициент / Coefficient	Расчетное значение / Calculated value	Дисперсия / Dispersion	Среднее квадратическое отклонение / Standard deviation	t-критерий Стьюдента / Student's t-test	Значимость коэффициентов / Significance of coefficients
b_0	4,07	1,89	1,37	2,96	значим / significant
b_1	2,73	0,30	0,55	4,97	значим / significant
b_2	0,34	0,30	0,55	-0,62	незначим / insignificant
b_3	-0,04	0,30	0,55	-0,06	незначим / insignificant
b_{12}	-1,86	0,41	0,64	2,90	значим / significant
b_{13}	-1,16	0,41	0,64	-1,81	незначим / insignificant
b_{23}	-2,84	0,41	0,64	4,41	значим / significant
b_{11}	-1,88	0,76	0,87	-2,16	значим / significant
b_{22}	4,75	0,76	0,87	5,44	значим / significant
b_{33}	-1,00	0,76	0,87	-1,15	незначим / insignificant

Адекватность уравнения оценивали с помощью F -критерия, расчетное значение которого:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s^2(\Delta Y)} = \frac{5,6}{3,31} = 1,69.$$

Табличное значение F -критерия при степенях свободы $f_{ад} = N - k = 9$ и $f_e = N(r - 1) = 15(2 - 1) = 15$ и 95-процентным уровнем значимости составляет $F_{табл} = 2,59$. Гипотеза об адекватности модели принимается, так как $F_p \leq F_{табл}$.

Таким образом, можно судить о соответствии теоретических и экспериментальных значений углов наклона осей форсунок распылителей, то есть уравнение (5) применимо для оптимизации конструктивных и режимных параметров адаптивного двухфакельного распылителя. Используя его, при заданной рабочей скорости X_3 определили оптимальные значения X_1 и X_2 из условия равенства нулю первой производной параметра оптимизации по значению этих углов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta Y}{\partial X_1} &= 2,73 - 1,86X_2 - 3,76X_1 = 0; \\ \frac{\partial \Delta Y}{\partial X_2} &= 1,86X_1 + 2,84X_3 - 9,5X_2 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решение системы уравнений (6) имеет вид:

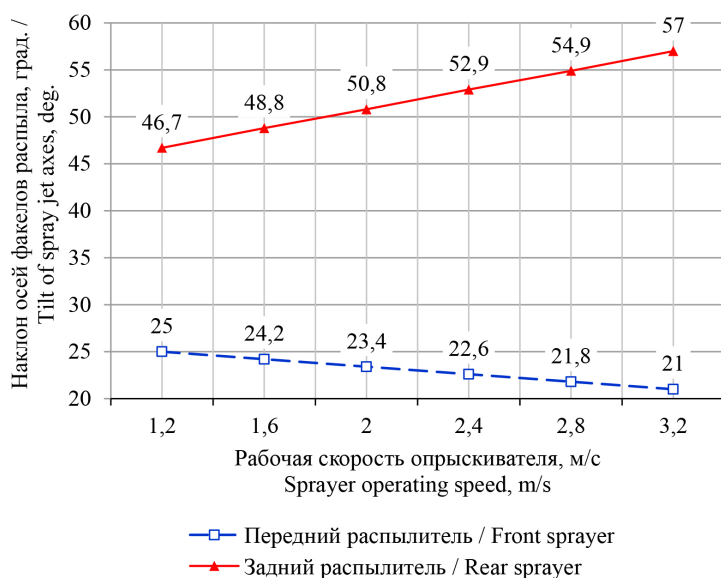
$$\begin{aligned} X_1 &= 0,665 - 0,135X_3; \\ X_2 &= 0,127 + 0,273X_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Обсуждение и заключение

В уравнения (7) подставили соотношения (4) и получили алгоритм изменения оптимальных натуральных значений факторов:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 27,4 - 2,03V, \text{ град.}; \\ \alpha_2 &= 40,6 + 5,12V, \text{ град.}\end{aligned}\quad (8)$$

Линейные взаимосвязи (8), полученные по экспериментальным данным, представлены на рисунке 4.



Р и с. 4. Влияние рабочей скорости опрыскивателя на величину углов наклона к вертикали осей переднего и заднего факелов распыла

F i g. 4. Influence of the sprayer operating speed on the inclination angle of the axes of the front and rear spray cones to the vertical

Из их анализа следует, что с повышением рабочей скорости опрыскивателя оптимальный угол наклона к вертикали оси переднего факела распыла α_1 уменьшается, а заднего α_2 – увеличивается.

Для оценки соответствия экспериментально-расчетных результатов (8) поставленной цели исследований провели дополнительный эксперимент. При скорости опрыскивателя $V = 2$ м/с установили давление рабочей жидкости $p = 2,1$ атм. Углы наклона к вертикали осей факелов распыла определили для заданной скорости по номограмме: $\alpha_1 = 23,4^\circ$; $\alpha_2 = 50,8^\circ$ (рис. 4). После эксперимента в двукратной повторности получили содержание площади следов капель на макете: с набегающей стороны – 19,1 %; с тыльной – 18,3 %. Разница составляет 0,8 % и в относительном измерении не превышает 4,5 %, что дает основание утверждать о достижении поставленной цели исследования.

Экспериментально обоснован алгоритм для оптимизации углов наклона к вертикали осей переднего и заднего факелов распыла адаптивного двухфакельного инжекторного распылителя IDK калибра 03 при внесении штанговым опрыскивателем 250 л/га рабочей жидкости. Согласно алгоритму, с увеличением рабочей скорости опрыскивателя с 1,2 до 3,2 м/с угол наклона к вертикали переднего факела линейно изменяется от 25 до 21°, а заднего – от 46,7 до 57°. Наличие алгоритма необходимо для подготовки технического задания по созданию процессора для автоматического поддержания оптимальных режимов опрыскивания в процессе выполнения работ по защите растений. Это позволит рационально использовать дорогостоящие химические препараты и снизить затраты на производимую растениеводческую продукцию. Позитивным следствием минимизации использования ресурсов является экологический эффект в виде понижения уровня химического воздействия на здоровье обслуживающего персонала и окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчин И. К., Потапов Р. И., Полтев М. И. Современные тенденции развития производства и применения химических средств защиты растений в Российской Федерации // АгроФорум. 2021. № 6. С. 25–28. EDN: [EIHZSE](#)
2. Influence of Plant Protection Products on Yield and Sowing Qualities of Spring Wheat Seeds / S. Liskovskyi [et al.] // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2021. № 65. P. 3–9. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-65-1-3-9>
3. Башкирев А. П., Шварц А. А., Шкабенко А. Ю. Анализ работы полевых опрыскивателей // Наука в центральной России. 2019. № 6 (42). С. 50–58. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-6-50-58>
4. A Critical Review of Effect Modeling for Ecological Risk Assessment of Plant Protection Products / F. Larras [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 43448–43500. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19111-3>
5. Plant Protection Products Residues Assessment in the Organic and Conventional Agricultural Production / V. Bursić [et al.] // Sustainability. 2021. Vol. 13, Issue 3. Article no. 1075. <https://doi.org/10.3390/su13031075>
6. Changes in Lung Function and Respiratory Symptoms During Pesticide Spraying Season Among Male Sprayers / R. Sapbamrer [et al.] // Archives of Environmental & Occupational Health. 2020. Vol. 75, Issue 2. P. 88–97. <https://doi.org/10.1080/19338244.2019.1577208>
7. Направления повышения эффективности использования полевых штанговых опрыскивателей / И. С. Крук [и др.] // Агропанорама. 2022. № 5 (153). С. 2–10. URL: <https://ap.bsatu.by/images/files/2022/AgroP-2022-05-int.pdf> (дата обращения: 22.08.2023).
8. Terra F. P., Nascimento G. H. d., Duarte G. A., et al. Autonomous Agricultural Sprayer Using Machine Vision and Nozzle Control / F. P. Terra [et al.] // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2021. Vol. 102, Issue 2. С. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01361-x>
9. Shahrooz M., Talaeizadeh A., Alasty A. Agricultural Spraying Drones: Advantages and Disadvantages // 2020 Virtual Symposium in Plant Omics Sciences (OMICAS). (23–27 November 2020). Bogota, 2020. <https://doi.org/10.1109/OMICAS52284.2020.9535527>
10. Разработка конструкции щелевого сельскохозяйственного распылителя и исследование его выходных параметров / В. Э Славкина [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 4. С. 34–37. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-34-37>
11. Оценка технологических и технических характеристик распылителей опрыскивателей / А. Б. Барагунов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 7 (133). <https://>



doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.62

12. Slavkina V. E., Goncharova Y. A. Types of Droplet Size Tests on Sprayers // Science in the Modern Information Society : Materials of the XXXI International Scientific and Practical Conference. Bengaluru, 2023. P. 95–100. EDN: [QKTLWX](https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.62)

13. Потемкин Р. А., Свиридов А. С. Особенности испытаний распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей // Технический сервис машин. 2020. № 4 (141). С. 47–53. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-4-47-53>

14. Свиридов А. С., Катаев Ю. В., Загоруйко М. Г. Анализ типов распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей // Аграрный научный журнал. 2021. № 6. С. 96–100. <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i6pp96-100>

15. Park S., Park K. Principles and Droplet Size Distributions of Various Spraying Methods: A Review // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. Vol. 36, Issue 8. P. 4033–4041. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0724-3>

16. Techno-Economic Impacts of Using a Laser-Guided Variable-Rate Spraying System to Retrofit Conventional Constant-Rate Sprayers / A. Manandhar [et al.] // Precision Agriculture. 2020. Vol. 21, Issue 5. P. 1156–1171. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09712-8>

17. Способ изменения угла наклона факелов распыла форсунок сельскохозяйственного опрыскивателя при его перемещении по полю : патент 2780840 Российская Федерация / Башкирев А. П., Шкабенко А. Ю. № 2021102413 ; заявл. 02.02.2021 ; опубл. 04.10.2022. 7 с.

18. Patil S. S., Patil Y. M., Patil S. B. Review on Automatic Variable-Rate Spraying Systems Based on Orchard Canopy Characterization // Informatics and Automation. 2023. Vol. 22, Issue 1. P. 57–86. <https://doi.org/10.15622/ia.22.1.3>

19. Fabula J. V., Sharda A., Mishler B. Quantification of Self-Propelled Sprayers Turn Compensation Feature Utilization and Advantages During On-Farm Applications // Precision Agriculture. 2022. Vol. 23, Issue 5. P. 1675–1687. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09903-5>

20. Распылитель сельскохозяйственного опрыскивателя : патент 2416466 Российская Федерация / Гуреев И. И. № 2008146305/12 ; заявл. 24.11.2008 ; опубл. 27.05.2010. 6 с.

21. Распылитель сельскохозяйственного опрыскивателя : патент KZ 7614 Республика Казахстан / Мухтаров М. У. [и др.]. № 2022/0880.2 ; заявл. 12.10.2022 ; опубл. 25.11.2022.

Поступила в редакцию 22.09.2023; поступила после рецензирования 08.10.2023; принята к публикации 23.10.2023

Об авторах:

Гуреев Иван Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, заведующий лабораторией Курского федерального аграрного научного центра (305021, Российская Федерация, г. Курск, ул. К. Маркса, 70Б), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>, gureev06@mail.ru

Нуралин Бекет Нургалиевич, доктор технических наук, профессор, профессор Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана (090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0507-5445>, bnuralin@mail.ru

Мухтаров Мурат Утембекович, докторант Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана (090009, Республика Казахстан, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5910-6811>, murat.utembek@mail.ru

Костюченкова Оксана Николаевна, кандидат технических наук, доктор философии, старший преподаватель кафедры транспортной техники и технологии Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина (010011, Республика Казахстан, Астана, пр-т Женис, 62), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2060-7083>, oху_uno@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

И. И. Гуреев – научное руководство, теоретическое обоснование эксперимента.

Б. Н. Нуралин – научное руководство, разработка программы и методики исследования.

М. У. Мухтаров – получение экспериментальных данных.

О. Н. Костюченкова – обзор литературы, статистическая обработка экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kolchin I.K., Potapov R.I., Poltev M.I. [Modern Trends in the Development of Production and Use of Chemical Plant Protection Products in the Russian Federation]. *AgroForum*. 2021;(6):25–28. (In Russ.) EDN: EIHZSE
2. Liskovskyi S., Demydov O., Siroshtan A., Kavunets V., Zaima O., Shevchenko T. Influence of Plant Protection Products on Yield and Sowing Qualities of Spring Wheat Seeds. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021;(65):3–9. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-65-1-3-9>
3. Bashkirev A.P., Shvarts A.A., Shkabenko A.Yu. Analysis of the Work of Field Sprayers. *Science in Central Russia*. 2019;(6):50–58. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-6-50-58>
4. Larras F., Charles S., Chaumot A., Pelosi C., Le Gall M., Mamy L., et al. A Critical Review of Effect Modeling for Ecological Risk Assessment of Plant Protection Products. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:43448–43500. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19111-3>
5. Bursić V., Stojanović T., Petrović A., Marinković D., Konstantinović B., Vuković G., et al. Plant Protection Products Residues Assessment in the Organic and Conventional Agricultural Production. *Sustainability*. 2021;13(3):1075. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/su13031075>
6. Sapbamrer R., Thongtip S., Khacha-ananda S., Wunnapuk K., Sittitoon N. Changes in Lung Function and Respiratory Symptoms During Pesticide Spraying Season Among Male Sprayers. *Archives of Environmental & Occupational Health*. 2020;75(2):88–97. <https://doi.org/10.1080/19338244.2019.1577208>
7. Kruk I.S., Gordeenko O.V., Karpovich S.K., Soroka S.V., Markevich A.E. [Directions for Increasing the Efficiency of Using Field Boom Sprayers]. *Agropanorama*. 2022;(5):2–10. Available at: <https://ap.bsatu.by/images/files/2022/AgroP-2022-05-int.pdf> (accessed 22.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Terra F.P., Nascimento G.H.d., Duarte G.A., Drews-Jr P.L.J. Autonomous Agricultural Sprayer Using Machine Vision and Nozzle Control. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021;102(2):1–18. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01361-x>
9. Shahrooz M., Talaeizadeh A., Alasty A. Agricultural Spraying Drones: Advantages and Disadvantages. In: 2020 Virtual Symposium in Plant Omics Sciences (OMICAS). Bogota, 2020. <https://doi.org/10.1109/OMICAS52284.2020.9535527>
10. Slavkina V.E., Sviridov A.S., Arumugam G., Goncharova Yu.A., Kasimov R.M. Developing the Design of a Slotted Agricultural Sprayer and Studying of Its Output Parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(4):34–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-34-37>
11. Baragunov A.B., Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Fiapshev A.G. An Evaluation of Technological and Technical Characteristics of Sprayer Atomizers. *International Research Journal*. 2023;(7). (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.62>
12. Slavkina V.E., Goncharova Y.A. Types of Droplet Size Tests on Sprayers. In: Science in the Modern Information Society. Materials of the XXXI International Scientific and Practical Conference. Bengaluru, 2023. P. 95–100. EDN: QKTLWX
13. Potemkin R.A., Sviridov A.S. Features of Testing Sprayers for Agricultural Machines. *Machinery Technical Service*. 2020;(4):47–53. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-4-47-53>
14. Sviridov A.S., Kataev Yu.V., Zagoruiko M.G. Analysis of the Types of Agricultural Sprayers' Nozzles. *The Agrarian Scientific Journal*. 2021;(6):96–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i6pp96-100>
15. Park S., Park K. Principles and Droplet Size Distributions of Various Spraying Methods: A Review. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022;36(8):4033–4041. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0724-3>



16. Manandhar A., Zhu H., Ozkan E., Shah A. Techno-Economic Impacts of Using a Laser-Guided Variable-Rate Spraying System to Retrofit Conventional Constant-Rate Sprayers. *Precision Agriculture*. 2020;21(5):1156–1171. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09712-8>
17. Bashkirev A.P., Shkabenko A.Yu. [Method for Changing Angle of Inclination of Spray Torches of Nozzles of Agricultural Sprayer, When It is Moved Across Field]. Patent 2,780,840 Russian Federation. 2022 October 4. 7 p. (In Russ.)
18. Patil S.S., Patil Y.M., Patil S.B. Review on Automatic Variable-Rate Spraying Systems Based on Orchard Canopy Characterization. *Informatics and Automation*. 2023;22(1):57–86. <https://doi.org/10.15622/ia.22.1.3>
19. Fabula J.V., Sharda A., Mishler B. Quantification of Self-Propelled Sprayers Turn Compensation Feature Utilization and Advantages During On-Farm Applications. *Precision Agriculture*. 2022;23(5):1675–1687. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09903-5>
20. Gureev I.I. [Sprayer of Agricultural Sprinkler]. Patent 2,416,466 Russian Federation. 2010 May 27. 6 p. (In Russ.)
21. Mukhtarov M.U., Nuralin B.N., Gureev I.I., Shadyarov T.M., Nuralin A.Zh., Okas K. [Atomizer of Agricultural Sprayer]. Patent KZ 7,614 Republic of Kazakhstan. 2022 November 25.

Submitted 22.09.2023; revised 08.10.2023; accepted 23.10.2023

About the authors:

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

Beket N. Nuralin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University (51 Zhangir Khan St., Uralsk 090009, Republic of Kazakhstan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0507-5445>, bnuralin@mail.ru

Murat U. Mukhtarov, Doctoral Student of Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University (51 Zhangir Khan St., Uralsk 090009, Republic of Kazakhstan), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5910-6811>, murat.utembek@mail.ru

Oksana N. Kostyuchenkova, Cand.Sci. (Engr.), PhD, Senior Lecturer of the Chair of Transport Engineering and Technology of the S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University (62 Zhenis Avenue, Astana 010011, Republic of Kazakhstan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2060-7083>, oxy_uno@mail.ru

Authors contribution:

I. I. Gureev – scientific guidance, theoretical justification of the experiment.

B. N. Nuralin – scientific guidance, development of research program and methodology.

M. U. Mukhtarov – obtaining experimental data.

O. N. Kostyuchenkova – literature review, statistical processing of experimental data.

All authors have read and approved the final manuscript.



Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи

А. В. Шутенко[✉], Д. О. Хорт
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)

[✉] pilotklin6@mail.ru

Аннотация

Введение. В статье описан процесс рассмотрения геометрических параметров струи воды в зависимости от ее режима работы и вида форсунки. В рамках исследования гидравлической обработки почвы в приствольных зонах возникла необходимость изучить параметры струи при различных видах насадок. Требовалось определить геометрические параметры потока воды для расчета площади поперечного сечения и определения структурных особенностей формирования струи. Данные характеристики важны для полноценного описания, последующего исследования и расчета действия струи воды при гидравлической обработке почвы. Также они позволяют изучить реальную форму и структуру струи при различных видах форсунки.

Цель исследования. Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи.

Материалы и методы. Для решения заданной цели был разработан стенд, представляющий собой подставку на четырех опорах, к которой закреплен адаптер подающей магистрали аппарата высокого давления со сменными форсунками (насадками). Для фиксации положения и формы струи воды с определенной частотой использовалась камера Basler acA1920. Также был использован аппарат высокого давления с максимальным давлением $P = 140$ МПа и расходом $Q = 360$ л/ч. В качестве насадок использовались: стандартная насадка с плоской струей, стандартная турбонасадка, турбонасадка разработанной конструкции. По полученным фотографиям измерялись геометрические параметры сечения струи воды. Проводился анализ структуры струи при разных режимах работы.

Результаты исследования. Удалось выяснить, что вращающийся поток воды, создаваемый в турбофорсунке собственной разработки и стандартной турбофорсунке, разбивается от быстрого вращения, образуя конус, площадь сечения которого составляет круг и воздействует на поверхность почвы. Для плоской струи характерна прямоугольная форма сечения.

Обсуждение и заключение. Форсунка предложенной конструкции позволяет создать струю воды наибольшей площади, что должно обеспечить увеличение ширины захвата и качества обработки поверхности почвы в приствольных насаждениях. Данное исследование также позволяет проанализировать структуру струи в процессе ее работы.

Ключевые слова: гидрообработка почвы, приствольные зоны, интенсивные сады, мульчирование, форсунки, геометрические параметры струи воды

© Шутенко А. В., Хорт Д. О., 2024



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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Шутенко А. В., Хорт Д. О. Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 88–100. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.088-100>

Original article

Determination of the Water Jet Geometric Parameters Depending on the Type of Nozzle and Jet Operation Mode

A. V. Shutenko , D. O. Khort

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

 pilotklin6@mail.ru

Abstract

Introduction. The article describes the process of considering the geometric parameters of water jet depending on a water jet operation mode and nozzle type. Within the framework of the study of hydraulic soil treatment in the under-tree zones, it became necessary to study the water jet parameters when using different types of nozzles. There was need to determine the geometric parameters of water flow for calculating the cross-sectional area and determining the structural features of the water jet formation. These characteristics are important for a complete description, subsequent study and calculation of water jet action during hydraulic soil treatment; they also allow studying the real shape and structure of the water jet when using different types of nozzles.

Aim of the study. The study is aimed at determining the geometric parameters of the water jet for different nozzles including turbo cutters located at different heights.

Materials and Methods. To solve this problem, there was developed a test bench, on four pillars, to which the adapter of the supply line of the high-pressure apparatus with replaceable nozzles is fixed. To fix the position and shape of the water jet with a certain frequency, a Basler ace acA1920 camera was used. There was also used a high-pressure apparatus with a maximum pressure of $P = 140$ MPa, a maximum flow rate of $Q = 360$ l/h. A standard nozzle with a flat jet, a standard turbo nozzle, and a turbo nozzle of the developed design were used. The geometric parameters of the water jet section were measured from the photographs obtained.

Results. From the photos obtained, it can be seen that the rotating water stream entering the turbo nozzle of its own design and the standard turbo nozzle disintegrates from rapid rotation, forming a cone, the cross-sectional area of which is a circle, and affects the soil surface. A flat jet is characterized by a rectangular cross-section.

Discussion and Conclusion. According to the results of the study we can draw the following conclusions, the nozzle of the proposed design allows creating water jets of the largest area, which should provide an increase in the working width and, as a consequence, an increase in productivity and quality of soil surface treatment in mainline plantations. This study will also make it possible to analyze the structure of the jet during its operation.

Keywords: soil hydrotreatment, tree trunk zones, intensive gardens, mulching, nozzles, geometric parameters of the water jet

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

For citation: Shutenko A.V., Khort D.O. Determination of Water Jet Geometric Parameters Depending on the Type of Nozzle and Jet Operation Mode. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):88–100. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.088-100>

Введение

В рамках исследования гидрообработки почвы от сорной растительности в приствольных зонах возникла необходимость рассмотреть параметры струи воды при различных видах насадок [1–4]. Данный метод обработки можно рассматривать как одну из альтернатив гербицидам или механической обработке почвы [5]. Сложностью реализации этого метода является необходимость создания струи воды, способной надежно разрушать задернелый почвенный покров глубиной до трех сантиметров [6], угнетая сорную растительность и обеспечивая ширину захвата рабочего органа порядка 300–450 мм. Особенностью гидрообработки является сосредоточенное воздействие на узкий участок поверхности почвы [7], вызывающее деформации сжатия, сдвига и местного растяжения пласта почвы, которые по форме сильно отличаются от воздействий, оказываемых механическими орудиями. Немаловажными факторами являются и режимы работы струи воды [8]. Так, наклон водной струи к поверхности почвы изменяет не только силу действия самой струи, но и площадь ее воздействия на почву. Также изменяется направление деформации почвы с сжатия на сдвиг или даже растяжение¹. Изменение вида воздействия струи значительно влияет на способность почвы сопротивляться разрушению [9].

Обозначим основные геометрические параметры струи, необходимые для определения площади сечения и структурных особенностей формирования струи воды при различных видах форсунок: ширина и толщина – для прямоугольного сечения, диаметр – для круглого [10]. Данные параметры важны для корректного описания, исследования и расчета действия струи воды при гидрообработке почвы. Они позволяют изучить реальную форму и структуру струи при различных видах форсунки, в том числе при турбо фрезях и их движении в составе агрегата.

Геометрические характеристики струи определяют площадь ее сечения, что является одним из ключевых параметров, устанавливающих давление струи воды на поверхность почвы, что значительно влияет на эффективность гидрообработки. Однако значение данного параметра достаточно сложно измерить, так как обычные средства измерения линейных размеров не применимы для струи воды. Задача усложняется также использованием турбо форсунок, в которых конус распыливания создается вращающейся струей воды, что полностью исключает стандартные методы измерения размеров. При этом необходимо обосновать и изучить форму воздействия струи на поверхность почвы при использовании турбо форсунок, так как форма струи при контакте с обрабатываемой почвой неизвестна.

Обзор литературы

В настоящее время разрушение и обработка материала струей жидкости применяется в различных отраслях экономики. Так, в работе И. Д. Мурашова исследуется применение высокоэнергетических струй воды для подготовки и резки мясной продукции [7]. В работе Д. А. Иванова описывается применение струи воды для разрушения керамических материалов локальным термоударом [11]. Широкое применение данный метод получил при гидроабразивной резке металлов [12].

¹ Сохранение плодородия орошаемых почв путем снижения негативного воздействия дождя ДМ «Фрегат» / А. В. Русинов [и др.] // Актуальные проблемы устойчивого развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: мат-лы Междунар. науч.-практич. конф. 2021. С. 236–243. URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/14177> (дата обращения 25.01.2024).

Гидроабразивная резка применяется и в горной промышленности. Математические модели процесса и его параметры описаны в одной из изученных нами работ [13]. В статье [14] описываются технологии совмещения лазера и гидроабразивной резки для создания обрабатывающих машин.

Применимость технологии гидрообработки приствольных зон садовых насаждений подтверждается в исследовании [15], где использование агрегата гидрообработки Caffini Gras Killer показало схожую эффективность с механическими методами обработки. Также гидрообработка рассматривается как одна из экологичных альтернатив применения химических средств борьбы с сорной растительностью в промышленных садах [16; 17]. Она может рассматриваться и как действенный способ борьбы с сорной растительностью [18]. В работах ряда зарубежных авторов обосновывается перспективность технологии угнетения сорной растительности гидрообработкой, описывается использование гидроабразивного метода для среза соломы пшеницы. А также разработка, расчет и результаты испытания устройства гидрообработки междурядий рисовых культур, описание способности струи воды и гидроабразивной обработки к резке различных сельскохозяйственных материалов и методы повышения их эффективности [19–22].

Обзор литературы показывает важность изучения структуры струи воды и процесса ее формирования при различных видах форсунок. Например, в работе [23] показано влияние формы штуцера на формирование структуры струи воды и последующую силу воздействия. Также наукой активно изучается влияние формы насадки и отверстия на струю воды при различной температуре [24; 25].

Материалы и методы

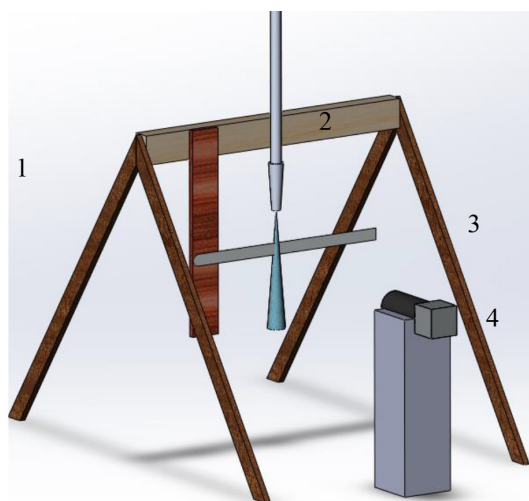
Для решения данной задачи был разработан стенд (рис. 1), представляющий собой подставку на четырех опорах, к которой закреплен адаптер подающей магистрали аппарата высокого давления со сменными насадками. Крепление адаптера позволяет менять высоту расположения форсунки. На подставке размещена рейка, позволяющая закреплять стальную линейку в плоскость действия струи воды из форсунки.

Для фиксации положения и формы струи воды с заданной частотой используется камера Basler ace acA1920. Она позволяет получать высококачественное видео с частой до 1000 кадров в секунду, данный режим съемки и был использован в нашем исследовании. Камера располагалась перпендикулярно оси симметрии струи воды и перпендикулярно измерительной поверхности линейки на расстоянии, необходимом для получения полноценной картинки и качественной фокусировки камеры.

Для исследований использовался аппарат высокого давления с максимальным давлением $P = 140$ МПа, максимальный расход $Q = 360$ л/ч.

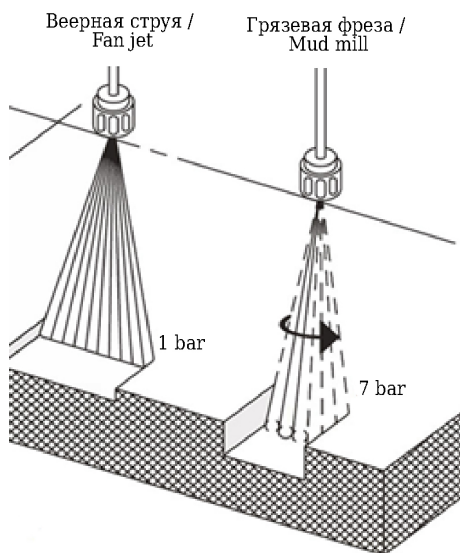
В качестве насадок использовались стандартная с плоской струей, стандартная турбо насадка (рис. 2) и турбо насадка разработанной конструкции (рис. 3).

Исследование проводится следующим образом. Подключенная к аппарату высокого давления форсунка закрепляется на стенд, линейка выставляется на заданную длину от среза сопла.



Р и с. 1. Устройство стенда для измерения геометрических параметров струи воды:
1 – подставка; 2 – подающая магистраль аппарата высокого давления со сменными форсунками;
3 – стальная линейка; 4 – камера

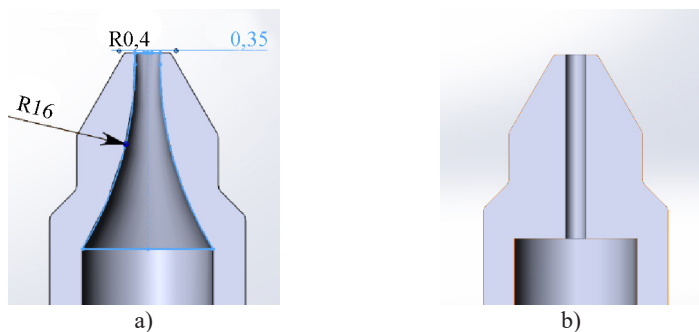
F i g. 1. Test bench design for measuring geometric parameters of water jet:
1 – stand; 2 – supply line of the high-pressure device with replaceable nozzles;
3 – steel ruler; 4 – camera



Р и с. 2. Виды исследуемых форсунок

F i g. 2. Types of nozzles investigated

Далее запускается подача воды и съемка камеры. Благодаря проецированию изображения перпендикулярно линейке получается измерить геометрические параметры сечения струи в каждый момент ее работы. Также данный метод позволяет зафиксировать работу форсунки в динамике.



Р и с. 3. Сечение форсунки турбо насадки разработанной конструкции (а), сечение форсунки стандартной турбо насадки (б)

F i g. 3. Section of the turbo nozzle of its own design (a), section of the standard turbo nozzle (b)

Результаты исследования

Площадь сечения струи воды разработанной турбо форсунки больше стандартной. При высоте 3 см – на 47 %, при высоте 5 – см на 53 %, при высоте 7 см – на 16 %, при высоте 9 см – на 5 %, при высоте 11 см у стандартной турбо форсунки площадь сечения струи больше на 5 %.

После проведения исследования по описанной выше методике полученный видеоматериал с помощью программы Free Video to JPG Converter кадрировался с сохранением отдельных изображений. По полученным изображениям измерялись геометрические параметры сечения струи воды, например, ширина струи (рис. 4).



Р и с. 4. Измерение ширины сечения струи воды для плоской форсунки на высоте 9 см от среза насадки

F i g. 4. Measuring the cross-section width of a water jet for a flat nozzle at a height of 9 cm from the nozzle cut

Значение ширины струи воды (диаметра конуса в измеряемом сечении для струй, имеющих круглое сечение) получается нахождением среднего из пяти значений. Также нами был проведен анализ структуры струи на разных режимах работы. Важным элементом обработки результатов было определение эффективной ширины струи без учета ее краевых участков, которые не имеют эффективного воздействия на обрабатываемую поверхность. Данные области отбрасывались согласно конусу распыления, который оставляет след на опорной поверхности. Для потока воды с сечением в виде круга измерялся диаметр данного сечения.

В результате исследования были получены данные, указанные в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

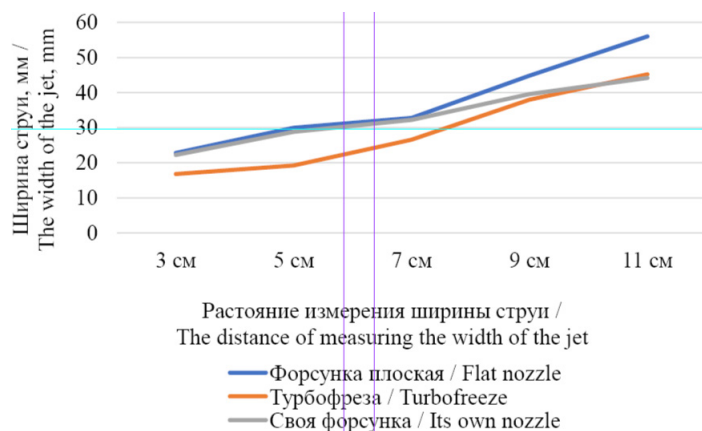
Результаты измерения ширины струи
Results of measuring the jet width

Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Ширина, мм / Width, mm	Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Ширина, мм / Width, mm	Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Ширина, мм / Width, mm
Форсунка плоская / Flat nozzle		Стандартная турбо форсунка / Standard turbo nozzle		Разработанная турбо форсунка / Developed turbo nozzle	
11	56	11	48	11	41
9	44	9	41	9	38
7	32	7	26	7	32
5	30	5	19	5	28
3	22	3	16,8	3	22

Для лучшей визуализации они оформлены в виде графика зависимости ширины захвата форсунки от высоты замера (рис. 5).

Как видно из графика (рис. 5), разработанная турбо форсунка имеет аналогичный с турбофрезой размер при высоте обработки 11 см. Однако значительно выигрывает в ширине при уменьшении высоты измерения до 3 см, приближаясь по ширине к форсунке с плоской струей. Полученный результат позволяет утверждать, что при наиболее эффективных значениях высоты обработки разработанная турбо форсунка будет иметь большую ширину захвата и повышенную производительность [26].

Исходя из представленных выше данных, вычислим площадь воздействия струи воды на поверхность почвы (рис. 6).



Р и с. 5. Графическое представление результатов измерения ширины струи на разной высоте
 F i g. 5. Graphical representation of the results of measuring the width of the jet at different heights



а) б)
 Р и с. 6. Структура струи у разработанной турбо форсунки (а) и стандартной турбо форсунки (б)
 F i g. 6. Jet structure of a developed turbo nozzle (a) and a standard turbo nozzle (b)

На основании полученных фотографий (рис. 6) видно, что вращающийся поток воды в разработанной турбо форсунке и стандартной турбо форсунке разбивается от быстрого вращения, образуя конус, площадь сечения которого составляет круг, и воздействует на поверхность почвы, поэтому для данных форсунок будем использовать формулу [27]:

$$S = \pi r^2, \quad (1)$$

где S – площадь воздействия струи воды на поверхность, мм^2 , а r – радиус основания конуса распыления струи, мм .

Для плоской струи характерна прямоугольная форма сечения (рис. 6), поэтому расчет будет вестись по следующей формуле (2):

$$S = a \cdot b, \quad (2)$$

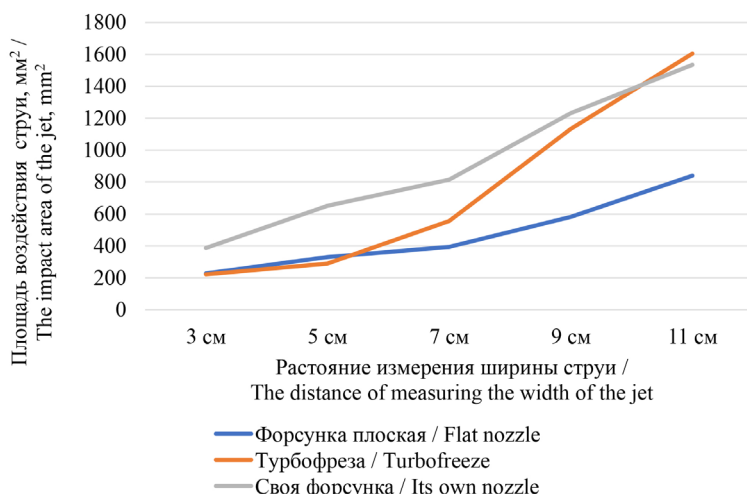
где S – площадь воздействия струи воды на поверхность, мм^2 ; a – ширина струи, мм ; b – толщина струи, мм . В результате вычислений получены следующие результаты (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Полученная площадь сечения струи
The resulting cross-sectional area of the jet

Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Форсунка плоская / Flat nozzle	
	Площадь, мм ² / Area, mm ²	Ширина, мм / Width, mm
3 см	182	22
5 см	270	30
7 см	328	32
9 см	492	44
11 см	840	56
Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Стандартная турбо форсунка / Standard turbo nozzle	
	Площадь, мм ² / Area, mm ²	Ширина, мм / Width, mm
3 см	201	16
5 см	284	19
7 см	531	26
9 см	1134	38
11 см	1590	45
Высота от среза сопла форсунки, см / Height from the nozzle section, cm	Разработанная турбо форсунка / Developed turbo nozzle	
	Площадь, мм ² / Area, mm ²	Ширина, мм / Width, mm
3 см	380	22
5 см	616	28
7 см	804	32
9 см	1195	39
11 см	1521	44

Далее представлен график, визуализирующий полученные результаты (рис. 7).



Р и с. 7. График зависимости площади воздействия струи воды от высоты струи
F i g. 7. Graph of dependence of water jet impact area on jet height

Как видно из графика, площадь воздействия струи воды у плоской форсунки меньше остальных вариантов. Наибольшая же площадь струи достигается у разработанной турбо форсунки.

Обсуждение и заключение

С помощью разработанной турбо форсунки возможно создать струи воды наибольшей площади, что обеспечивает увеличение ширины захвата, повышение производительности и качества обработки поверхности почвы в приствольных насаждениях.

Результаты данного исследования позволяют проанализировать структуру струи в процессе ее работы. У всех видов форсунок струя разбивается на мелкие капли, образуя зону обработки поверхности без выделенных зон собранного структурированного потока жидкости. Также опыт показывает, что площадь обрабатываемой поверхности зависит не только от высоты расположения форсунки и давления воды, но и от угла факела распыла сопла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы создания новых машин для промышленного садоводства / А. Ю. Измайллов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 3. С. 20–23. EDN: QINCQT
2. Танкаева А. М., Алиев Т. Г. Г., Пальчиков Е. Н. Состояние и проблемы изучения гербицидов // Наука и образование. 2020. Т. 3, № 4. С. 239. URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/2409/2408> (дата обращения 25.01.2024).
3. Хажметова А. Л., Карданов Р. А., Хажметов Л. М. К вопросу совершенствования машин для обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2021. № 2 (32). С. 89–94. URL: <https://clck.ru/38QMAN> (дата обращения 25.01.2024).
4. Перспективные системы содержания почвы в интенсивных садах семечковых культур / Т. Г. Г. Алиев [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2019. № 2 (28). С. 29–33. EDN: OYICJJ
5. Sustainable Crop and Weed Management in the Era of the EU Green Deal: A Survival Guide / A. Tataridas [et al.] // Agronomy. 2022. Vol. 12, Issue 3. P. 589. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030589>
6. Машина для приствольной обработки почвы / С. Ф. Сороченко [и др.] // Ползуновский альманах. 2022. № 3. С. 128–130. EDN: EGHWJI
7. Мурашов И. Д., Крюкова Е. В., Мирзоян Д. Г. Установка для резания мякотного и мясостного сырья высокоэнергетической струей воды // American Scientific Journal. 2020. Т. 1, № 43. С. 47–50. <https://doi.org/10.31618/asj.2707-9864.2020.1.43.50>
8. Математическое обоснование гидрорезки пищевых продуктов / И. Д. Мурашов [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. № 3. С. 184–189. <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-3-184-189>
9. Слюсаренко В. В., Русинов А. В., Акпасов А. П. Сохранение плодородия сельскохозяйственных почв за счет снижения негативного воздействия дождя дождевальными машинами // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : мат-лы I нац. науч.-практ. конф. с международным участием. 2019. С. 588–594. EDN: ZAHCVN
10. Анализ параметров работы устройства для гидравлического удаления сорной растительности / А. Ю. Измайллов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 614–634. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.614-634>
11. Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Кутырев А. И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 35–41. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
12. Abrasive Water Jet Machining Process: A state of art of review / Y. Natarajan [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 49. P. 271–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030>

13. Ren F., Fang T., Cheng X. Study on Rock Damage and Failure Depth under Particle Water-jet Coupling Impact. International Journal of Impact Engineering. 2020. Vol. 139. Article no. 103504. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103504>
14. Overview on the Development and Critical Issues of Water Jet Guided Laser Machining Technology / Y. Liu [et al.] // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 137. Article no. 106820. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106820>
15. An Alternative Tool for Intra-Row Weed Control in a High-Density Olive Orchard / A. Assirelli [et al.] // Agronomy. 2022. Vol. 12, Issue 3. P. 605. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030605>
16. Sustainable Alternatives to Chemicals for Weed Control in the Orchard – A Review / M. J. Mia [et al.] // Horticultural Science. 2020. Vol. 47, Issue 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.17221/29/2019-HORTSCI>
17. Информационно-техническое обеспечение производственных процессов в садоводстве / А. Ю. Измайлов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 6. С. 36–40. EDN: THJNUL
18. Amgain N. R., Fontanier C. H., Martin D. L. Short-Term Effects of Alternative Cultivation Practices on Putting Green Infiltration Rates // Crop Science. 2021. Vol. 61, Issue 6. P. 4425–4435. <https://doi.org/10.1002/csc2.20604>
19. Design Optimization and Mechanism Analysis of Water Jet-Type Inter-Plant Weeding Device for Water Fields / W. Zhou [et al.] // Agronomy. 2023. Vol. 13, Issue 5. P. 1305. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051305>
20. Applications of Water Jet Cutting Technology in Agricultural Engineering: A Review / D. Cui [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, Issue 18. P. 8988. <https://doi.org/10.3390/app12188988>
21. Analysis of Waterjet Treatment for Herbicide-free Vegetation Management on Railway Tracks / A. Schulte-Marxloh [et al.] // WJTA Conference and Expo. 2022. URL: <https://www.wjta.org/images/wjta/2022conference/Proceedings/A6-2022.pdf> (дата обращения 25.01.2024).
22. Experimental Study of Abrasive Waterjet Cutting for Managing Residues in No-Tillage Techniques / F. Perotti [et al.] // Agriculture. 2021. Vol. 11, Issue 5. P. 392. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050392>
23. Лихоманов А. О., Камлюк А. Н. Длина начального участка осесимметричной турбулентной струи, образующейся в пенном розеточном оросителе для автоматических установок пожаротушения // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2021. Т. 5, № 2. С. 159–173. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.159>
24. Обоснование параметров робототехнического средства с опрыскивателем и модулем магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве / А. Ю. Измайлов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 1. С. 3–10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-11-1-3-10>
25. Бусов К. А., Мажейко Н. А. Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал квадратного сечения // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 2. С. 316–320. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020022>
26. Хилько И. И., Сапун Л. Г. Совершенствование рабочих органов высоконапорных моечных установок // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2022. № 53. С. 165–170. URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/download/637/642> (дата обращения 25.01.2024).
27. Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы / Д. О. Хорт [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 25–34. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34>

Поступила в редакцию 01.06.2023; поступила после рецензирования 29.09.2023; принята к публикации 10.10.2023

Об авторах:

Шутенко Александр Витальевич, инженер научно-исследовательской лаборатории Разработки изделий нано- и микросистемной техники Московского института электронной техники (124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0394-4514>, pilotklin6@mail.ru

Хорт Дмитрий Олегович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией машинных технологий для возделывания и уборки плодовых и ягодных культур Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, Researcher ID: Q-2695-2017, dmitriyhort@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. В. Шутенко – введение, обзор литературных источников, разработка математической модели расчета геометрических параметров струи, обоснование параметров исполнительного устройства, обработка статистических данных.

Д. О. Хорт – постановка цели и проблематики исследования, формулировка его результатов, определение технологических параметров и режимов работы исполнительного устройства.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Smirnov I.G., Khort D.O. Actual Problems of Creation of New Machines for Industrial Gardening. *Agricultural Machines and Technologies*. 2013;(3):20–23. (In Russ.) EDN: QINCQT
2. Tankayeva A.M., Aliev T.G.G., Palchikov E.N. State and Problems of Studying Herbicides. *Science and Education*. 2020;3(4):239. (In Russ.) Available at: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/2409/2408> (accessed 25.01.2024).
3. Khazhmetova A.L., Kardanov R.A., Khazhmetov L.M. The Issue of Improving Machines for Processing Trunk Strips of Fruit Plantations in Terrace Gardening. *News of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University*. 2021;(2):89–94. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/38QMAN> (accessed 25.01.2024).
4. Aliev T.G.G., Bobrovich L.V., Usova G.S., Matsnev I.N., Palchikov E.V. Promising Systems of Soil Content in Intensive Orchards of Pome Crops. *Technologies of Food and Processing Industry Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2019;(2):29–33. (In Russ.) EDN: OYICJJ
5. Tataridas A., Kanatas P., Chatzigeorgiou A., Zannopoulos S., Travlos I. Sustainable Crop and Weed Management in the Era of the EU Green Deal: A Survival Guide. *Agronomy*. 2022;12(3):589. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030589>
6. Sorochenko S.F., Chuklin N.M., Razzamazov N.I., Ugarov V.A. Machine for Near-Tree Tillage. *Polzunovskiy almanac*. 2022;(3):128–130. (In Russ.) EDN: EGHWJI
7. Murashov I.D., Kryukova E.V., Mirzoyan D.G. Installation for Cutting Meat and Meat Raw Materials with a High-Energy Water Jet. *American Scientific Journal*. 2020;1(43):47–50. <https://doi.org/10.31618/asj.2707-9864.2020.1.43.50>
8. Murashov I.D., Goryacheva E.D., Kryukova E.V., Mirzoyan D.G. Mathematical Justification of Hydro-Cutting of Food Products. *Technologies of Food and Processing Industry Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2021;(3):184–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-3-184-189>
9. Slyusarenko V.V., Rusinov A.V., Akpasov A.P. Preservation of the Fertility of Agricultural Soils by Reducing the Negative Impact of Rain From Sprinklers. *Innovations of Environmental Management and Environmental Protection: Materials of the 1st National Scientific and Practical Conference with International Participation*. 2019;588–594. (In Russ.) EDN: ZAHCVN
10. Izmaylov A.Yu., Khort D.O., Smirnov I.G., Filippov R.A., Kutyrev A.I. Analysis of Work Parameters of the Device for Hydraulic Removal of Weed Vegetation. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(4):614–634. (In Russ.) <http://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.614-634>
11. Smirnov I.G., Khort D.O., Kutyrev A.I. Intelligent Technologies and Robotic Machines for Garden Crops Cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):35–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
12. Natarajan Y., Murugesan P.K., Mohan M., Liyakath Ali Khan S.A. Abrasive Water Jet Machining Process: A State of Art of Review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;49:271–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030>
13. Ren F., Fang T., Cheng X. Study on Rock Damage and Failure Depth under Particle Water-jet Coupling Impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2020;139:103504. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103504>
14. Liu Y., Wei M., Zhang T., Qiao H., Li H. Overview on the Development and Critical Issues of Water Jet Guided Laser Machining Technology. *Optics & Laser Technology*. 2021;137:106820. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106820>

15. Assirelli A., Ciaccia C., Giorgi V., Zucchini M., Neri D., Lodolini E.M. An Alternative Tool for Intra-Row Weed Control in a High-Density Olive Orchard. *Agronomy*. 2022;12(3):605. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030605>
16. Mia M.J., Massetani F., Murri G., Neri D. Sustainable Alternatives to Chemicals for Weed Control in the Orchard – a Review. *Horticultural Science (Prague)*. 2020;47(1):1–12. <https://doi.org/10.17221/29/2019-HORTSCI>
17. Izmaylov A.Yu., Smirnov I.G., Artyushin A.A., Filippov R.A., Khort D.O. Information and Technical Support of Operating Processes in Gardening. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;(6):36–40. EDN: THJNUL
18. Amgain N. R., Fontanier C. H., Martin D. L. Short-Term Effects of Alternative Cultivation Practices on Putting Green Infiltration Rates. *Crop Science*. 2021;61(6):4425–4435. <https://doi.org/10.1002/csc2.20604>
19. Zhou W., Song K., Sun X., Fu Q., Wang Y., Wang Q., et al. Design Optimization and Mechanism Analysis of Water Jet-Type Inter-Plant Weeding Device for Water Fields. *Agronomy*. 2023;13(5):1305. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051305>
20. Cui D., Li H., He J., Wang Q., Lu C., Hu H., et al. Applications of Water Jet Cutting Technology in Agricultural Engineering: A Review. *Applied Sciences*. 2022;12(18):8988. <https://doi.org/10.3390/app12188988>
21. Cui D., Li H., He J., Wang Q., Lu C., Hu H., et al. Applications of Water Jet Cutting Technology in Agricultural Engineering: A Review. *Applied Sciences*. 2022;12(18):8988. <https://doi.org/10.3390/app12188988>
22. Perotti F., Annoni M., Calcante A., Monno M., Mussi V., Oberti R. Experimental Study of Abrasive Waterjet Cutting for Managing Residues in No-Tillage Techniques. *Agriculture*. 2021;11(5):392. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050392>
23. Likhomanov A.O., Kamlyuk A.H. The Breakup Length of Axisymmetric Turbulent Jet in the Foam Deflector Type Sprinkler for Automatic Extinguishing Systems. *Journal of Civil Protection*. 2021;5(2):159–73. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.159>
24. Izmaylov A.Yu., Khort D.O., Smirnov I.G., Filippov R.A., Kutyrev A.I. Justification of Parameters of Robotic Means with Sprayer and Module Magnetic-Pulse Processing of Plants in Horticulture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017;(1):3–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-1-3-10>
25. Busov K.A., Mazheiko N.A. Boiling of a Jet of Superheated Water with Outlet through a Nozzle with a Square Section. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2021;59(2):316–320. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020022>
26. Khilko I.I., Sapun L.G. Improvement of Working Bodies of High-Pressure Washing Units. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2022;(53):165–170. Available at: <https://mechel.belal.by/jour/article/download/637/642> (accessed 25.01.2024).
27. Khort D.O., Kutyrev A.I., Smirnov I.G., Moiseev G.V., Soloviev V.I. Agricultural Autonomous Robotic Platform Motion Control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):25–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34>

Submitted 01.06.2023; revised 29.09.2023; accepted 10.10.2023

About the authors:

Aleksandr V. Shutenko, Engineer of the Research Laboratory for Development of Nano- and Micro-systems Engineering Products, Moscow Institute of Electronic Technology (1 Shokin Sq., Zelenograd, Moscow 124498, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0394-4514>, pilotklin6@mail.ru

Dmitry O. Khort, D.Sci. (Engr.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Machine Technologies for Cultivation and Harvesting of Fruit and Berry Crops, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, Researcher ID: Q-2695-2017, dmitriyhort@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Shutenko – introduction, literature review, development of the mathematical model, calculation of geometrical parameters of the jet, justification of the parameters of the actuating device, processing of statistical data.

D. O. Khort – setting the purpose and problems of the research, formulation of its results, determination of technological parameters and operating modes of the actuator.

All authors have read and approved the final manuscript.



Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы

Н. И. Джаббаров¹, А. П. Савельев²✉, А. В. Добринов¹,
А. М. Захаров¹, И. И. Жуйков¹

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ

(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

✉ tbsap52@mail.ru

Аннотация

Введение. Предотвращение загрязнения окружающей среды, включая водные объекты, биогенными элементами (азотом и фосфором) при их выносе с сельскохозяйственных угодий с возможными стоками является актуальной проблемой современной агроинженерной науки, которая требует своевременного решения. Исследованиями установлено, что вынос биогенных элементов происходит в результате геохимических процессов, внесения на поле удобрений и иных факторов. В этой связи математическое моделирование процесса выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий и возможного их попадания в водные объекты является актуальной задачей агроинженерных исследований.

Цель исследования. Смоделировать и спрогнозировать процесс возможного выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в водоемы.

Материалы и методы. При проведении исследования применялись известные методы моделирования; методика расчета выноса биогенных веществ в водоемы с сельскохозяйственных угодий (с опорой на минимальный объем исходной информации) для прогноза эвтрофирования водных объектов; агрохимические методики, учитывающие структуру и размеры полевых и сельскохозяйственных площадей, урожайность культур, вынос биогенных элементов с урожаем.

Результаты исследования. На основе анализа литературы и экспертной оценки был обоснован перечень наиболее значимых показателей, влияющих на процесс выноса азота и фосфора. Разработаны математические модели для определения и прогнозирования поступления биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в водные объекты. Установлены весовые показатели, влияющие на количество поступления биогенных элементов, а именно количество внесенных удобрений, объем влаги, влагоемкость почвы, площадь поля, глубина обработки и др. Приведен пример расчета количества поступления биогенных элементов в водные объекты при интенсивности выпадения осадков 50 мм в течение часа.

© Джаббаров Н. И., Савельев А. П., Добринов А. В., Захаров А. М., Жуйков И. И., 2024



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

Обсуждение и заключение. Сущность предложенных математических моделей сводится к синтезу многочисленных показателей в сложном процессе выноса биогенных элементов и их влияния на качество воды. Предложенные математические модели позволят прогнозировать вынос биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий, разрабатывать и внедрять технико-технологические решения, предотвращающие загрязнение окружающей среды.

Ключевые слова: сельскохозяйственные угодья, обработка почвы, биогенные элементы, водные объекты, агрофизические свойства почвы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы / Н. И. Джаббаров [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 101–114. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>

Original article

Modeling and Forecasting the Removal of Biogenic Elements from Agricultural Lands Depending on the Soil Agrophysical Properties

N. I. Jabbarov^a, A. P. Savelyev^{b✉}, A. V. Dobrinov^a,
A. M. Zakharov^a, I. I. Zhuikov^a

^a Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific
Agroengineering Center VIM
(Saint Petersburg, Russian Federation)

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

✉ tbsap52@mail.ru

Abstract

Introduction. Environmental pollution prevention, including prevention of water bodies, with nutrients (nitrogen and phosphorus) when they are removed from agricultural lands with possible runoff is a topical problem that requires a timely solution. The studies have found that the removal of nutrients is a result of geochemical processes, fertilization, and other factors. In this regard, mathematical modeling of the process of removal of nutrients from agricultural lands and their possible entry into water bodies is an urgent task.

Aim of the Study. The study is aimed at modeling and predicting the process of possible removal of nutrients from agricultural lands to water bodies.

Materials and Methods. When conducting the study, there were used well-known modeling methods. They are the methods for calculating the removal of nutrients from agricultural objects into water bodies, based on the minimum amount of initial information for predicting the eutrophication of water bodies and agrochemical methods taking into account the structure and size of field and agricultural areas, crop yields, and removal nutrients with the harvest.

Results. Based on an analysis of the literature and expert judgment, a list of the most significant indicators influencing the process of nitrogen and phosphorus removal was justified. There have been developed mathematical models to determine and predict the input of nutrients from agricultural lands to water bodies. There have been found significant indicators influencing the amount of input of nutrients, such as the amount of applied fertilizers, the volume of moisture, soil water capacity, field area, depth of

cultivation, etc. There is given an example of calculating the amount of input of nutrients into water bodies with a rainfall intensity of 50 mm per hour.

Discussion and Conclusion. The essence of the proposed mathematical models comes down to the synthesis of numerous indicators in the complex process of removal of nutrients and their impact on water quality. The proposed mathematical models make it possible to predict the removal of nutrients from agricultural lands and to develop and implement technical and technological solutions to prevent environmental pollution.

Keywords: agricultural land, tillage, biogenic elements, water bodies, soil agrophysical properties

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

For citation: Jabborov N.I., Savelyev A.P., Dobrinov A.V., Zakharov A.M., Zhuikov I.I. Modeling and Forecasting the Removal of Biogenic Elements from Agricultural Lands Depending on the Soil Agrophysical Properties. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):101–114. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>

Введение

Снижение выбросов азота и фосфора неразрывно связано с разработкой и освоением методов и средств определения и оценки количества поступления данных биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в водные объекты. Основными источниками выноса загрязняющих веществ являются пашни, сенокосы, пастбища, залежи, земли, занятые многолетними насаждениями, фермы и коммунально-бытовые отходы из населенных пунктов.

Вопросы выноса биогенных элементов из животноводческих ферм и комплексов, а также проблема рационального и экологически безопасного размещения ферм достаточно хорошо изучены в работах отечественных ученых¹. Ими подробно рассмотрены процессы формирования и динамики биогенной нагрузки на водные объекты, обоснованы подходы к изучению проблемы. По результатам исследований учеными разработаны методики оценки биогенной нагрузки, сформировавшейся под влиянием природных и антропогенных факторов, практические рекомендации по оптимальному проектированию животноводческих ферм и комплексов, систем мониторинга и управления по удалению, хранению и подготовке к использованию навоза.

Существующие классические методики в целом позволяют определить утечку азота и фосфора с площадок складирования минеральных и органических удобрений и по статистической информации для каждого административного района водосбора установить поголовье животных, рассчитать выход навоза, содержание и выход азота и фосфора с отходами, рассчитать вынос биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в гидрографическую сеть с учетом экспликации угодий и урожайности сельскохозяйственных культур.

¹ Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. РД-АПК 1.10.15.02-08 / Минсельхоз РФ. М., 2008. 93 с. ; Рекомендации по обоснованию экологически безопасного размещения и функционирования животноводческих и птицеводческих предприятий / А. Ю. Брюханов [и др.]. СПб. : ИАЭП, 2015. 48 с. ; Бойченко З. А., Чуян Г. А., Тур О. П. Прогнозирование содержания биогенных элементов в стоке с сельскохозяйственных угодий // *Агрохимия*. 1985. № 5. С. 73–79 ; Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 276 с.

Возросший повсеместный интерес к обеспечению экологической безопасности технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции требует совершенствования существующих методов поиска новых подходов и технико-технологических решений, обеспечивающих снижение выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий.

Цель исследования – моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы.

Обзор литературы

Одной из актуальных проблем современной науки является обеспечение экологической безопасности технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции. Во всех зонах земледелия наибольшую значимость приобрели вопросы снижения или предотвращения выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий. Вместе с тем учеными более подробно изучены вопросы выноса азота, фосфора и калия растениями и их содержание в культурных и сорных растениях [1–3].

Учеными исследованы особенности влияния режимов минерального питания на урожай и вынос элементов питания маточной сахарной свеклы, выращиваемой методом штеклингов на орошении в зоне неустойчивого увлажнения [4]. Представлены результаты изучения влияния минеральных удобрений, последствий навоза и совместного их влияния на урожайность и качество зерна озимой пшеницы [5]. Описаны результаты опыта по влиянию различных доз минерального питания на динамику содержания общего азота, фосфора и калия в пахотном слое (0–20 см) серой лесной тяжелосуглинистой почвы в условиях юга Центрального Нечерноземья [6]. Выполнена оценка массы переносимых трансграничными реками бассейна Западной Двины (рр. Западная Двина, Каспля, Свольня, Усвяча, Уща) валового азота и валового фосфора на территорию Республики Беларусь [7]. Выявлено, что межгодовые изменения массы выноса определяются преимущественно объемом речного стока. Это позволило оценить вынос валового азота и фосфора в годы различной водности с использованием данных о средних за 2011–2016 гг. концентрациях биогенных элементов.

Авторами работ дана общая оценка поступления в окружающую среду отходов животноводческого производства и внесения органических и минеральных удобрений на исследуемой территории [8]. Выявлено, что в пунктах отбора проб воды складывается умеренно напряженная экологическая ситуация в связи с периодическим сверхнормативным поступлением биогенных загрязняющих веществ в исследуемые водные объекты. Разработана методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты [9], которая призвана решить первостепенную задачу определения роли различных источников (таких как поверхностный сток, эрозия, грунтовые, почвенные, дренажные воды, осадение из атмосферы) в процессе поступления биогенных веществ с российской части водосборного бассейна Балтийского моря. Дана оценка поступления азота и фосфора в водные объекты с сельскохозяйственных угодий [10] в пределах частного водосборного бассейна реки Нарвы в период с 2006 по 2018 г. Дан анализ

причины загрязнения Нытвенского водохранилища биогенными веществами, приводящими в условиях замедленного водообмена к его эвтрофикации. Авторами научных работ рассмотрены основные источники загрязнения водных экосистем [11], приведены примеры факторов негативного влияния на водные объекты. Установлено, что рассредоточенный сток с сельскохозяйственных территорий оказывает негативное воздействие на поверхностные водные объекты, увеличивая содержание в их водах биогенных веществ². При изучении гидроэкологического состояния водных экосистем установлено [12], что увеличение объемов хозяйственной деятельности близ водных объектов обуславливает ухудшение их гидрохимических характеристик, изменение которых можно рассматривать в качестве основного индикатора негативного влияния на водную среду. В литературных источниках приведены результаты мониторингового исследования влияния сельскохозяйственного использования на содержание общего углерода, азота и фосфора в верхних горизонтах почв разного генезиса [13]. Выявлено, что проблема эвтрофирования водных объектов является одной из наиболее серьезных как на глобальном, так и на региональном уровнях [14]. Ключевым фактором эвтрофикации в Беларуси, по многолетним данным мониторинга, является содержание в воде соединений фосфора. В работе Бутько А. А. и Родькина О. И. [15] представлены результаты мониторинга гидрохимического состава вод малой реки Приморской, дана характеристика качества воды, рассчитан вынос минеральных форм азота и фосфора со стоком реки в Калининградский залив Балтийского моря в 2021–2022 гг. Дана оценка возможного снижения выноса биогенных элементов с водосборов притоков Куйбышевского водохранилища за счет внедрения наилучших доступных технологий сельскохозяйственного производства³. Выявлено, что количество внесенных в почву азота и фосфора в составе минеральных и органических удобрений для большинства административных районов изучаемого региона ниже потребности растительных культур в биогенных элементах. Это приводит к постепенному обеднению почв питательными веществами и снижению риска миграции этих элементов в водные объекты [16].

Учеными предложен макрорегиональный метод для интегрированного управления и контроля выбросов азота и фосфора в результате антропогенного воздействия на окружающую среду, раскрывающий перспективы снижения биогенной нагрузки на водные объекты [17].

Рассмотрены методы и средства извлечения азота и фосфора из сточных вод [18], предложены эффективные способы удаления питательных веществ из сточных вод [19], методы биологического удаления азота из сточных вод [20].

На основе анализа литературных источников и экспертной оценки в качестве основных и наиболее значимых показателей оценки выноса биогенных элементов

² Иванченкова О. А., Калашникова О. А. Источники антропогенного воздействия на водные экосистемы // Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная : мат-лы X Междунар. науч.-практ. конф. (29 апреля 2021 г., г. Брянск). Брянск : Изд-во БГИТУ, 2021. С. 211–215. EDN: PHNNYG

³ Ширчкова А. Н., Цветкова Н. Н. Вынос биогенных веществ со стоком реки Приморской в Калининградский залив // Балтийский морской форум : мат-лы X Междунар. Балтийского морского форума. Т. 3. (26 сентября–01 октября 2022 г., г. Калининград). Калининград, 2022. С. 248–255. EDN: CNWMTL

в водные объекты были установлены: количество внесенных удобрений (азота и фосфора) в почву при возделывании сельскохозяйственных культур, объем влаги, полная влагоемкость почвы, площадь поля, глубина обработки.

Материалы и методы

При проведении исследований использовались известные методы моделирования и методика расчета выноса биогенных веществ в водоемы с сельскохозяйственных объектов (с опорой на имеющийся минимально необходимый объем исходной информации) для прогноза эвтрофикации водных объектов, а также агрохимические методики, учитывающие структуру и размеры полевых и сельскохозяйственных площадей, урожайность культур, вынос биогенных элементов с урожаем.

Расчеты по определению возможного количества выноса биогенных элементов с пашни площадью 1 га при выпадении осадков 50 мм (или 500 м³/га) в час и различных значениях глубины обработки почвы (5, 20 и 30 см) произведены на основе статистических данных, собранных в Северо-Западной части России.

Исследования проводились в четыре этапа:

- первый включал в себя анализ исследований по вопросу выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий;
- на втором этапе исследований были установлены наиболее весомые показатели, влияющие на количество выноса азота и фосфора;
- третий предусматривал моделирование процесса выноса биогенных элементов;
- на четвертом этапе на основе статистических данных произведены расчеты по выносу биогенных элементов при фиксированном значении выпадении осадков при различных значениях глубины обработки почвы.

Результаты исследования

Моделирование процесса поступления биогенных элементов. По результатам экспертной оценки и анализа литературы были установлены наиболее весомые показатели, влияющие на вынос азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий, такие как количество внесенных удобрений, объем влаги, влагоемкость почвы, площадь поля, глубина обработки и др.

На рисунке 1 представлена схема, показывающая взаимосвязь выноса азота и фосфора с другими зависящими от него показателями.

Для количественной оценки и сопоставления базового (допустимого) значения выноса биогенных элементов с текущим значением в качестве критерия был выбран минимум количества поступления азота и фосфора в водные объекты $A'_{NP} \rightarrow \min$.

Исходя из проведенного анализа, можно говорить о том, что количество выноса азота и фосфора существенно зависит от дозы внесения удобрений, объема влаги, влагоемкости, глубины обработки, плотности и пористости почвы, площади поля и может быть выражено формулой:

$$A'_{NP} = f(N_{NP}, Q_b, W^n, F, h), \quad (1)$$

где N_{NP} – количество внесенных удобрений (азота и фосфора), кг/га; Q_b – объем влаги, м³; W^n – полная влагоемкость почвы, %; F – площадь поля, м²; h – глубина обработки, см.

Основной критерий / The main criterion	Обобщенные показатели / Generalized indicators	Управляемые (нормируемые) воздействия / Controlled (normalized) impacts
Минимум количества поступления азота и фосфора в водные объекты / The minimum amount of nitrogen and phosphorus entering water bodies $A'_{NP} \rightarrow \min$	Плотность почвы / Soil density: ρ Доза внесения удобрений / The dose of fertilizer application: NPK Объем влаги / Moisture volume: Q_v Влагоемкость почвы / Soil moisture capacity: W^n Площадь поля / Field area: F Глубина обработки почвы / Depth of tillage: h Пористость почвы / Soil porosity: $X_{пор}$	Приемы обработки почвы / Soil treatment techniques Количество проходов МТА / Number of MTA passes Глубина обработки почвы / Depth of tillage Доза, тип и агрегатное состояние удобрений / The dose, type and aggregate state of fertilizers Приемы и способы внесения удобрений / Methods and methods of fertilization

Р и с. 1. Схема взаимосвязи критерия минимума количества поступления биогенных элементов в водные объекты с другими зависящими от него показателями

F i g. 1. Diagram of the relationship between the criterion for the minimum amount of nutrients entering water bodies and other indicators that depend on it

Количество биогенных элементов с 1 га сельскохозяйственных угодий, которое может поступить в водные объекты, можно рассчитать по формуле:

$$A'_{NP} = Q_{\Pi} \cdot \psi_{NP}, \text{ кг}, \quad (2)$$

где Q_{Π} – величина потери воды на сброс, м³; ψ_{NP} – содержание (концентрация) азота и фосфора в стоке⁴, кг/м³.

Величину потери воды на сброс Q_{Π} можно определить из выражения:

$$Q_{\Pi} = Q_v - Q_{уп}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где Q_v – количество воды, поданной на 1 га (атмосферные осадки или оросительные воды), м³; $Q_{уп}$ – количество влаги (воды), которое может удержать почва, м³.

Количество влаги $Q_{уп}$, которое может удержать почва, определяется из выражения:

$$Q_{уп} = 10^{-4} \cdot W^n \cdot F \cdot h, \text{ м}^3, \quad (4)$$

где W^n – полная влагоемкость почвы, %; F – площадь поля, м²; h – глубина обработки почвы, см.

⁴ Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Электронный ресурс] : Приложение к приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13 дек. 2016 г. № 552. URL: <https://base.garant.ru/71586774/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/#friends> (дата обращения: 06.10.2023).

Значение содержание азота и фосфора можно определить по формуле:

$$\psi_{NP} = \left[\begin{aligned} & (N_N - V_N^{пв} - V_N^{раст} - V_N^{исп} - V_N^{алс}) + \\ & + (N_p - V_p^{пв} - V_p^{раст}) \end{aligned} \right] \cdot f_a \cdot Q_b^{-1}, \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

где N_N – количество внесенных на 1 га азотных удобрений, кг; N_p – количество внесенных на 1 га фосфорных удобрений, кг; $V_N^{пв}$ – вынос азота с 1 га в подпочвенные горизонты, кг; $V_N^{раст}$ – вынос азота с 1 га растениями, кг; $V_N^{исп}$ – улетучивание азота в виде аммиака и закиси азота, которое зависит от температуры и влажности почвы, кг. Потери азота из-за улетучивания в среднем составляют 15 % от внесенного⁵ его количества; $V_N^{алс}$ – потери азота с 1 га в процессе адсорбции, кг; $V_p^{пв}$ – вынос фосфора с 1 га в подпочвенные горизонты, кг; $V_p^{раст}$ – вынос фосфора с 1 га растениями, кг; f_a – коэффициент⁶, учитывающий влияние агротехнического фона на концентрацию биогенных веществ в стоке.

Полная влагоемкость соответствует состоянию полной насыщенности почвы водой, когда ею заполнены все поры. Ее величина зависит от пористости почвы и рассчитывается по формуле⁷:

$$W^п = \frac{P}{\rho_n}, \quad (6)$$

где $W^п$ – полная влагоемкость (в % от сухой почвы); P – пористость (в % от объема почвы); ρ_n – плотность почвы (г/см³).

Полная влагоемкость почвы⁸ обычно колеблется в пределах 40–50 %.

В нормативных документах предельно допустимая концентрация⁹ азота и фосфора в водах водных объектов рыбохозяйственного значения составляет 1 мг/дм³ или (0,001 кг/м³), что следует учитывать при определении показателя A'_{NP} по выражению (2).

Скорость передвижения жидкости сквозь толщу массива почвы определяется по формуле¹⁰:

$$V_{об} = K_{\phi} \cdot S \cdot gradl = 10^{-2} \cdot K_n \cdot \rho_w \cdot S \cdot \frac{gradl}{\eta}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации; K_n – коэффициент проницаемости, м² или см²; (коэффициентом проницаемости называют физическую величину, которая характеризует способность вещества пропускать жидкости и газы; при неизменных

⁵ Ягодин Б. А., Жуков Ю. П., Кобзаренко В. И. Агрохимия / Под ред. Б. А. Ягодина. М. : Колос, 2002. 584 с.

⁶ Вынос биогенных элементов с водосборов малых рек республики Татарстан / О. Н. Урбанова [и др.] // Вестник Удмуртского университета. 2015. Т. 25, вып. 4. С. 45–52.

⁷ Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы. РД 52.33.219–2022 / ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Обнинск, 2023. 121 с.

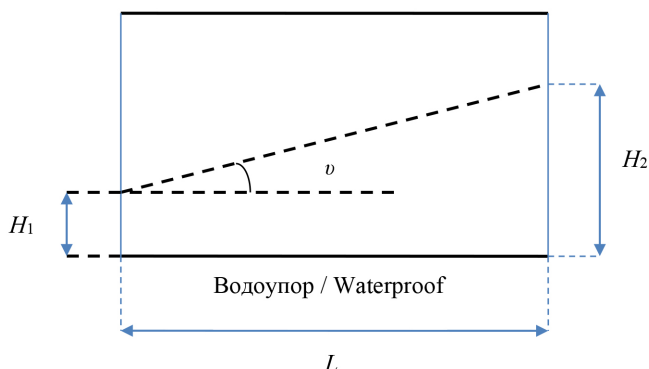
⁸ Исаенко В. А., Горбунов М. Ю. Водно-физические свойства почвы и их изменение при различных технологиях обработки почвы в севообороте // Вестник Курганской ГСХА. 2012. № 4. С. 16–19.

⁹ Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03 / Минздрав России. М., 2003. 214 с.

¹⁰ ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации : дата введения 2017-05-01. М. : Стандартинформ, 2016. 19 с.

вязкости и градиенте давления с ростом коэффициента проницаемости скорость фильтрации увеличивается); S – площадь поперечного сечения грунта, через который проходит вода; $gradl$ – градиент напора; ρ_w – плотность воды, г/см³; η – вязкость воды.

Гидравлический градиент i – напорный градиент – безразмерная величина потерь напора на единице длины пути движения жидкости (рис. 2). Отражает степень сопротивления среды при движении воды. В динамике подземных вод гидравлический градиент (пьезометрический уклон) пропорционален скорости фильтрации и в зависимости от геологического строения и состава пород изменяется в основном от сотых до тысячных долей единицы.



Р и с. 2. Схема определения гидравлического градиента¹¹
F i g. 2. Scheme for determining the hydraulic gradient¹¹

Скорость движения воды зависит от уклона поверхности поля. Значение гидравлического градиента i равно отношению потери напора $H = H_2 - H_1$ к длине пути фильтрации L и выражается¹¹:

$$i = \operatorname{tg} v = \frac{H_2 - H_1}{L} = \frac{H}{L}. \quad (8)$$

Время, требуемое для выноса из определенной площади азота и фосфора, можно рассчитать по формуле:

$$t_{NP}^{\text{вын}} = \frac{(3600 \cdot A'_{NP} \cdot h \cdot F)}{(V_{\text{ос}} \cdot Q_B \cdot \rho_w \cdot \omega_k)}, \quad (9)$$

где A'_{NP} – количество азота и фосфора, которое может поступить в водные объекты, кг/га; F – площадь поля, га; h – глубина обработки почвы, см; $V_{\text{ос}}$ – скорость передвижения жидкости сквозь толщу массива почвы, см/с.; Q_B – объем влаги, м³; ρ_w – плотность воды, кг/м³; ω_k – концентрация NP в жидкости.

Необходимо отметить, что для полного выноса азота и фосфора требуется, чтобы $W'' \geq 2Q_B$.

¹¹ Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации : учеб. пособие. М. : Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.

Предложенная авторами данной статьи математическая модель (2) и ее составляющие (3), (4) и (5) являются результатом дальнейшего совершенствования моделирования сложного процесса выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий. Предложенная математическая модель, по сравнению с используемыми в научных кругах моделями, описывает процесс с учетом площади сельскохозяйственных угодий, глубины обработки, пористости, влагоемкости и других агрофизических свойств почвы.

С использованием выражений (1)–(9) были произведены расчёты по определению возможного количества выноса биогенных элементов с пашни площадью 1 га при выпадении осадков 50 мм (или 500 м³/га) за час и различных значениях глубины обработки почвы – 5, 20 и 30 см.

При расчетах приняты начальные условия: переуплотненный слой почвы находится ниже глубины ее обработки, содержание азота в почве – 30 кг/га, фосфора – 120 кг/га, общая концентрация азота и фосфора в 1 м³ воды соответствует 0,21 кг.

Обсуждение и заключение

Разработана математическая модель для определения и прогнозирования выноса биогенных элементов в зависимости от агрофизических свойств почвы. Сущность предложенной математической модели сводится к синтезу многочисленных показателей и их взаимодействия в сложном процессе оценки снижения негативного влияния биогенных элементов.

Результаты расчетов, соответствующих выпадению осадков 50 мм/ч (500 м³/га), показали, что при глубине обработки $h \geq 13,7$ см почва полностью может удерживать влагу, при этом не происходит ее сток за пределы поля. Отсутствует вынос биогенных элементов с поля, то есть $A'_{NP} = 0$.

При глубине обработки $h < 13,7$ см количество накопившейся воды в почве превышает полную ее влагоемкость, и происходит сток излишней влаги с поля. Чем меньше глубина обработки, тем больше будет величина стока излишней влаги, в которой содержатся биогенные элементы. При этом концентрация биогенных элементов в стоке будет больше, если удобрения внесены на поверхность или незначительную глубину. При глубоком внутривпочвенном внесении удобрений их концентрация будет снижаться.

При глубине обработки $h = 10$ см объем излишней влаги, которая стекает с поля, составляет 136,0 м³. В этом случае количество биогенных элементов, которое может быть вынесено с водой, составит $A'_{NP} \leq 28,5$ кг с 1 га.

При обработке почвы на глубине всего $h = 5$ см с поля может стекать 426,5 м³ излишней влаги, что приводит к выносу биогенных элементов до $A'_{NP} \leq 89,5$ кг с 1 га.

По значениям A'_{NP} можно судить об уровне экологической опасности выноса биогенных элементов с поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астарханов И. Р., Астарханова Т. С., Алибалаев Д. А. Влияние органических удобрений на вынос питательных элементов растениями картофеля и содержание питательных элементов в растениях // Известия Дагестанского ГАУ. 2022. № 4 (16). С. 23–28. EDN: BGFCCE

2. Плотников А. М., Созинов А. В. Баланс элементов питания в севообороте при использовании сапропеля, извести, азотно-фосфорного удобрения // Проблемы агрохимии и экологии. 2022. № 3–4. С. 26–31. EDN: **BSAYPK**
3. Тедесева В. В., Абаев А. А., Тавказахов С. А. Вынос элементов минерального питания сорняками на посевах сои // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97–8. С. 94–97. <https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-455>
4. Применение удобрений и вынос элементов питания маточной сахарной свеклой летних посевов на орошении / А. В. Логвинов [и др.] // Сахарная свекла. 2022. № 10. С. 20–24. EDN: **DCCYFG**
5. Морозова Т. С., Лицуков С. Д., Ширяев А. В. Содержание и вынос элементов питания растениями озимой пшеницы в зависимости от применения удобрений // Вестник аграрной науки. 2021. № 2 (89). С. 40–49. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-i-vynos-elementov-pitaniya-rasteniyami-ozimoy-pshenitsy-v-zavisimosti-ot-primeneniya-udobreniy/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
6. Артюхова О. А., Гладышева О. В., Свирина В. А. Вынос питательных элементов урожаем ярового ячменя в зависимости от уровня минерального питания // Плодородие. 2021. № 4 (121). С. 6–10. EDN: **ADXEBP**
7. Оценка и прогноз выноса биогенных веществ с российской части бассейна реки Западная Двина на территорию республики Беларусь / В. Ю. Георгиевский [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86, № 2. С. 243–254. <https://doi.org/10.31857/S2587556622020042>
8. Биогенное загрязнение водных объектов в сельскохозяйственных районах Белгородской области / А. Г. Корнилов [и др.] // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47, № 1. С. 76–87. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
9. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты / А. Ю. Брюханов [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175–183. EDN: **XAGHJT**
10. Задонская О. В., Обломкова Н. С., Брюханов А. Ю. Сравнительный анализ применения различных методов оценки поступления азота и фосфора от сельского хозяйства в бассейне реки Нарвы // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 1 (110). С. 142–155. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primeneniya-razlichnyh-metodov-otsenki-postupleniya-azota-i-fosfora-ot-selskogo-hozyaystva-v-bassejne-reki/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
11. Ракутин М. Ю., Капустин Т. Н. Подход к оценке загрязнения малоизученных водных объектов биогенными элементами (на примере Нытвенского пруда пермского края) // Астраханский вестник экологического образования. 2020. № 5 (59). С. 162–172. EDN: **LJIACI**
12. Оценка неконтролируемого стока биогенных веществ с водосборных территорий малых водотоков Среднего Урала, включенных в сельскохозяйственное использование / Е. В. Федорова [и др.] // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 68–86. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nekontroliruemogo-stoka-biogennyh-veschestv-s-vodosbornykh-territoriy-malykh-vodotokov-srednego-urala-vklyuchennykh-v/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
13. Биогенное загрязнение водных объектов в сельскохозяйственных районах Белгородской области / А. Г. Корнилов [и др.] // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47, № 1. С. 76–87. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
14. Дубровина И. А. Изменение содержания общего углерода, азота и фосфора в почвах таежной зоны Республики Карелия при сельскохозяйственном использовании // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 41. С. 27–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-soderzhaniya-obshego-ugleroda-azota-i-fosfora-v-pochvah-taеzhnoy-zony-pri-selskohozyaystvennom-ispolzovanii/viewer> (дата обращения: 06.10.2023).
15. Бутько А. А., Родькин О. И. Прогнозирование поступления фосфора в водные объекты с территории агроландшафтов // Экологический вестник. 2012. № 2. С. 76–83. EDN: **NKANZG**
16. Перспективы сокращения выноса биогенных элементов с речных водосборов за счет внедрения наилучших доступных технологий сельскохозяйственного производства (по результатам моделирования) / Ш. Р. Позднякова [и др.] // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 588–602. <https://doi.org/10.31857/S0321059620050168>

17. Workshop Background Report Managing Nitrogen and Phosphorus Loads to Water Bodies: Characterisation and Solutions Towards Macro-Regional Integrated Nutrient Management Under Enlargement and Integration Action European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability JRC-Ispira (14–15 July 2014) / eds by A. Karabulut Aloe, et al. Ispira, 2014. 80 p. <https://doi.org/10.2788/14322>
18. Sengupta S., Nawaz T., Beaudry J. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater // Current Pollution Reports. 2015. Vol. 1. P. 155–166. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1>
19. Ruzhitskaya O., Gogina E., Shmalko V. Effective Removal of Nutrients from Wastewater // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 178. Article no. 09015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809015>
20. Breisha G.Z. Bio-removal of nitrogen from wastewaters – A review // Nature and Science. 2010. Vol. 8, Issue 12. P. 210–228. URL: https://sciencepub.net/nature/ns0812/28_4053ns0812_210_228.pdf (дата обращения: 06.10.2023).

Поступила в редакцию 04.12.2023; поступила после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 28.12.2023

Об авторах:

Джаббаров Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Добринов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Захаров Антон Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, Researcher ID: S-4113-2018, bauermmw@mail.ru

Жуйков Илья Иванович, аспирант Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3702-1485>, raynov96@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Н. И. Джаббаров – научное руководство, формулирование концепции решения, моделирование процесса.

А. П. Савельев – анализ литературных источников, постановка задачи.

А. В. Добринов – анализ результатов исследования, составление структуры статьи.

А. М. Захаров – формулировка выводов.

И. И. Жуйков – расчет и анализ показателей.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



REFERENCES

1. Astarkhanov I.R., Astarkhanova T.S., Alibalaev D.A. Effect of Organic Fertilizers on Depletion of Nutrients by Potato Plants and Nutrient Content in Plants. *Dagestan GAU Proceedings*. 2022;(4):23–28. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [BGFCCE](#)
2. Plotnikov A.M., Sozinov A.V. The Balance of Nutrition Elements in Crop Rotation with the Use of Saproel, Lime, Nitrogen-Phosphorus Fertilizer. *Agrochemistry and Ecology Problems*. 2022;(3–4):26–31. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [BSAYPK](#)
3. Tedeeva V.V., Abaev A.A., Tavkazakhov S.A. [Removal of Mineral Nutrition Elements by Weeds from the Soils of Soybean Areas]. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*. 2023;(97–8):94–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18411/trnio-05-2023-455>
4. Logvinov A.V., Shevchenko A.G., Koshkin S.S., Pleshakov A.A., Mukhanova S.M., Dmitrova E.S., et al. The Use of Fertilizers and the Removal of Nutrients by the Mother Sugar Beet of Summer Crops under Irrigation. *Sakharnaya Svekla*. 2022;(10):20–24. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [DCCYFG](#)
5. Morozova T.S., Litsukov S.D., Shiryayev A.V. Nutrient Content and Its Removal with Winter Wheat Plants Depending on Fertilizer Application. *Vestnik Agrarnoy Nauki*. 2021;(2):40–49. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-i-vynos-elementov-pitaniya-rasteniyami-ozimoy-pshenitsy-v-zavisi-mosti-ot-primeneniya-udobreniy/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Artyukhova O.A., Gladysheva O.V., Svirina V.A. Mineral Nutrition Level and Nutrition Element Withdrawal Spring Barley in the Conditions of the Ryazan Region. *Plodorodie*. 2021;(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [ADXEBP](#)
7. Georgievsky V.Yu., Alekseev L.P., Bryukhanov A.Yu., Georgievsky D.V., Golosovsky P.A., Grek E.A., et al. Assessment and Forecast of Nutrient Loading from the Russian Part of the Zapadnaya Dvina River Basin to Belarus. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2022;86(2):243–254. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2587556622020042>
8. Kornilov A.G., Kiselev V.V., Kurepina V.A., Lopina E.M., Borovlev A.E. Biogenic Pollution of Water Bodies in Agricultural Areas of the Belgorod Region. *Regional Geosystems*. 2023;47(1):76–87. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
9. Bryukhanov A.Yu., Kondratiev S.A., Oblomkova N.S., Ogluzdin A.S., Subbotin I.A. Calculation Method of Agricultural Nutrient Load on Water Bodies. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktov Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2016;(89):175–183. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [XAGHJT](#)
10. Zadonskaya O.V., Oblomkova N.S., Bryukhanov A.Yu. Comparative Application Analysis of Different Methods for Assessing the Agricultural Nitrogen and Phosphorus Inputs in the Narva River Basin. *AgroEkolInzheneriya*. 2022;(1):142–155. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-primeneniya-razlichnyh-metodov-otsenki-postupleniya-azota-i-fosfora-ot-selskogo-hozyaystva-v-basseynereki/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Rakutin M.Yu., Kapustin T.N. Approach to Assessment of Pollution of Low-Studied Water Bodies with Biogenic Elements (On the Example of Nytvensky Pond, Perm Territory). *Astrahanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2020;(5):162–172. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [LJIACI](#)
12. Fedorova E.V., Karpunina O.P., Shchipacheva L.A., Belyaeva I.U. Assessment of Uncontrolled Runoff of Biogenic Substances from the Middle Ural Small Watercourses Catchment Territories Involved into Agriculture. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022;(1):68–86. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nekontroliruemogo-stoka-biogennyh-veschestv-s-vodosbornykh-territoriymalyh-vodotokov-srednego-urala-vklyuchennyh-v/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kornilov A.G., Kiselev V.V., Kurepina V.A., Lopina E.M., Borovlev A.E. Biogenic Pollution of Water Bodies in Agricultural Areas of the Belgorod Region+. *Regional Geosystems*. 2023;47(1):76–87. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-1-76-87>
14. Dubrovina I.A. Change in the Content of Total Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Boreal Soils of the Republic of Karelia When Used in Agriculture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2018;(41):27–41. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-soderzhaniya-obshchego-ugleroda-azota-i-fosfora-v-pochvah-taizhnoy-zony-pri-selskohozyaystvennom-ispolzovanii/viewer> (accessed 06.10.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

15. Butko A.A., Rodkin O.I. Prognoz of Phosphorus Input in to the Water Objects from the Agrolandscape Areas. *Ekologicheskii Vestnik*. 2012;(2):6–83. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [NKANZG](#)
16. Pozdnyakova Sh.R., Bryukhanov A.Yu., Kondratyeva S.A., Ignatieva N.V., Shmakova M.V., Minakovas E.A., et al. [The Prospects for Reducing the Removal of Biogenic Elements from River Catchments Through the Introduction of the Best Available Technologies for Agricultural Production (Based on Modeling Results)]. *Water Resources*. 2020;47(5):588–602. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0321059620050168>
17. Karabulut Aloe A., Bouraoui F., Grizzetti B., Bidoglio G., Pistocchi A., editors. Workshop Background Report Managing Nitrogen and Phosphorus Loads to Water Bodies: Characterisation and Solutions Towards Macro-Regional Integrated Nutrient Management Under Enlargement and Integration Action European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability JRC-Ispira (14–15 July 2014). Ispira, 2014. <https://doi.org/10.2788/14322>
18. Sengupta S., Nawaz T., Beaudry J. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. *Current Pollution Reports*. 2015;1:155–166. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1>
19. Ruzhitskaya O., Gogina E., Shmalko V. Effective Removal of Nutrients from Wastewater. *MATEC Web of Conferences*. 2018;178:09015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809015>
20. Breisha G.Z. Bio-Removal of Nitrogen from Wastewaters – A Review. *Nature and Science*. 2010;8(12):210–228. Available at: https://sciencepub.net/nature/ns0812/28_4053ns0812_210_228.pdf (accessed 06.10.2023).

Submitted 04.12.2023; revised 15.12.2023; accepted 28.12.2023

About the authors:

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production of the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: [A-7780-2019](#), nozimjon-59@mail.ru

Anatoliy P. Savelyev, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, Institute of Mechanics and Power Engineering of the National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: [AAB-2078-2021](#), tbsap52@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Senior Research Officer, Department of Agroecology in Crop Production of the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: [AAC-9655-2020](#), a.v.dobrinov@yandex.ru

Anton M. Zakharov, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>, Researcher ID: [S-4113-2018](#), bauermw@mail.ru

Ilya I. Zhuikov, Postgraduate Student of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production (IEEP) Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3702-1485>, raynov96@mail.ru

Authors contribution:

- N. I. Jabborov – scientific guidance, formulation of the solution concept, process modeling.
- A. P. Savelyev – analysis of literary sources, problem statement.
- A. V. Dobrinov – analysis of research results, compilation of the structure of the article.
- A. M. Zakharov – formulation of conclusions.
- I. I. Zhuikov – calculation and analysis of indicators.

All authors have read and approved the final manuscript.



Повышение равномерности внесения минеральных и известковых удобрений

В. А. Овчинников^{1✉}, Н. А. Жалнин¹, А. Д. Комолов¹,
Е. С. Зыкин², И. Ю. Тюрин³

¹ Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

² Ульяновский ГАУ (г. Ульяновск, Российская Федерация)

³ Вавиловский университет

(г. Саратов, Российская Федерация)

✉ ovchinnikovv81@yandex.ru

Аннотация

Введение. Современное сельскохозяйственное производство основано на применении ресурсосберегающих технологий производства растениеводческой продукции. Важным элементом данных технологий является применение минеральных удобрений, равномерности внесения которых уделяют особое внимание.

Цель исследования. Совершенствование процесса внесения минеральных и известковых удобрений путем разработки пневмоцентробежного рабочего органа.

Материалы и методы. В теоретических исследованиях использовались положения математики и теоретической механики. Экспериментальные исследования проводились на полигоне института механики и энергетики Мордовского государственного университета. Оценка качества работы агрегата, оснащенного экспериментальными рабочими органами, проводили согласно ГОСТ 28714-2007.

Результаты исследования. В целях более качественного распределения по поверхности поля минеральных удобрений, неоднородных по гранулометрическому составу, предложен рабочий орган, принцип работы которого основан на суммарном использовании механического и пневматического воздействия на частицы вносимого материала. Использование разработанных рабочих органов позволяет увеличить равномерность внесения удобрений на 17,6 %.

Обсуждение и заключение. В результате проведенных исследований доказана эффективность применения разработанного пневмоцентробежного рабочего органа, позволяющего увеличить равномерность распределения минеральных и известковых удобрений.

Ключевые слова: минеральные удобрения, рабочий орган, равномерность внесения, кинетическая энергия, экспериментальный агрегат, характер распределения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Повышение равномерности внесения минеральных и известковых удобрений / В. А. Овчинников [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 115–127. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.115-127>

© Овчинников В. А., Жалнин Н. А., Комолов А. Д., Зыкин Е. С., Тюрин И. Ю., 2024



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

Increasing the Uniformity of Application of Mineral and Lime Fertilizers

V. A. Ovchinnikov^{a✉}, N. A. Zhalnin^a, A. D. Komolov^a,
E. S. Zykin^b, I. Yu. Tyurin^c

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

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

^c Saratov State Vavilov Agrarian University
(Saratov, Russian Federation)

✉ ovchinnikovv81@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modern agricultural production is based on the use of resource-saving technologies for agricultural production. An important element of these technologies is the use of mineral fertilizers and special importance is given to the uniformity of applying them.

Aim of the Study. The study is aimed at improving the process of applying mineral and lime fertilizers through the development of a pneumatic centrifugal working body.

Materials and Methods. For the theoretical studies, there were used the principles of mathematics and theoretical mechanics. The experimental studies were carried out at the testing ground of the Institute of Mechanics and Energy of Mordovia State University. The quality assessment of the operation of the unit equipped with experimental working bodies was carried out in accordance with GOST 28714-2007.

Results. To better distribute mineral fertilizers of heterogeneous granulometric composition over the field surface, there has been proposed a working element, the operating principle of which is based on the total use of mechanical and pneumatic effects on the granules of the agricultural inputs. The use of the developed working bodies makes it possible to increase the uniformity of fertilizer application by 17.6%

Discussion and Conclusion. As a result of the conducted study, there has been proven the effectiveness of using the developed pneumocentrifugal working body, which makes it possible to increase the uniformity of distribution of mineral and lime fertilizers.

Keywords: mineral fertilizers, working body, uniformity of application, kinetic energy, experimental unit, pattern of distribution

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

For citation: Ovchinnikov V.A., Zhalnin N.A., Komolov A.D., Zykin E.S., Tyurin I.Yu. Increasing the Uniformity of Application of Mineral and Lime Fertilizers. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):115–127. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.115-127>

Введение

Обеспечение населения продуктами питания во многом зависит от производства зерна, гарантирующего продовольственную безопасность страны¹. Качество и объемы зерна, в свою очередь, зависят от большого количества технологических операций, производимых на всех стадиях его производства².

¹ Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс] : Указ Президента РФ от 21 янв. 2020 г. № 20. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45106> (дата обращения: 06.10.23).

² Полянская Н. А. Повышение экономической эффективности производства зерна на основе оптимизации использования ресурсов : дис. ... канд. экон. наук. Княгинино, 2012. 153 с.

На сегодняшний день внесение удобрений – одна из важнейших операций в передовых технологиях производства сельскохозяйственных культур, оказывающая влияние на качественные критерии получаемого урожая [1–3]. Необходимо также помнить, что внесение удобрений приводит к восстановлению плодородия почвы³ [4–6]. Данный эффект весьма важен в вопросе сохранения и воспроизводства плодородия почв ввиду их деградации во многих регионах России⁴ [7; 8].

Процесс внесения удобрений, как и иные операции, необходимо проводить в сжатые сроки, строго соблюдая агротехнические требования⁵.

В настоящее время по причине своей эффективности, удобства внесения и хранения наибольшее распространение получили минеральные удобрения⁶. К основным требованиям, предъявляемым к такого рода удобрениям, относятся их рассыпчатость, стойкость к слеживанию и гранулометрический состав [9].

По результатам исследований установлено [10–12], что в процессе внесения минеральных удобрений с разным гранулометрическим составом возрастает неравномерность их распределения по поверхности поля (рис. 1), что негативно сказывается на эффективности их применения.

Поэтому исследования, посвященные повышению равномерности внесения минеральных и известковых удобрений, являются актуальными и имеют важное научно-техническое и хозяйственное значение для агропромышленного комплекса страны.

Обзор литературы

Для внесения минеральных удобрений применяют всевозможные разбрасыватели различной компоновки и оснащения. Объединяющим их элементом, как правило, является центробежный рабочий орган, совершенствованию конструктивно-технологических параметров которого уделяется особое внимание [13–19].

Как отмечают многие исследователи, рабочая ширина внесения и качество распределения удобрений зависят от высоты установки рабочего органа, его угловой скорости, углов размещения лопаток и их наклона относительно горизонта [18; 20]. Наиболее простым в реализации способом является изменение угловой скорости, однако доказано, что на высоких оборотах рабочего органа происходит повреждение частиц удобрений [15; 21].

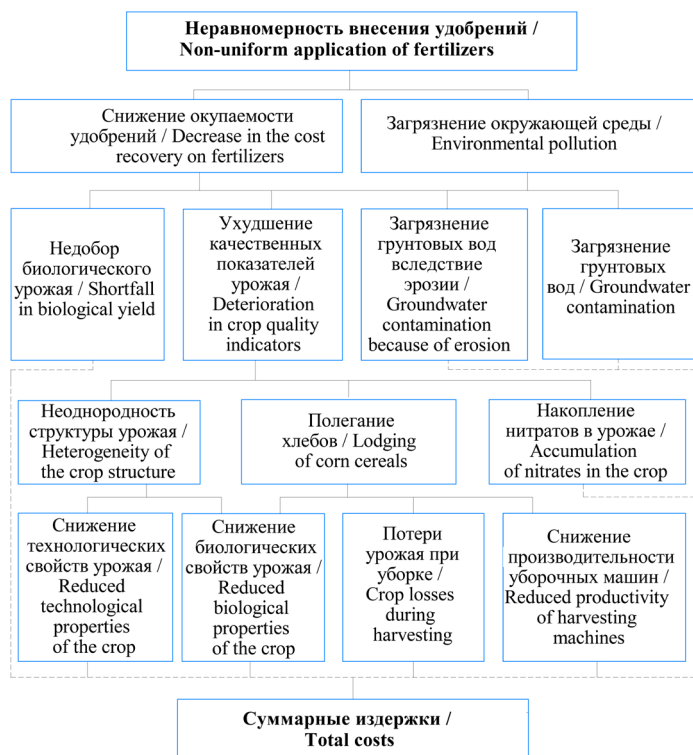
Ряд других ученых, утверждая о невозможности предсказать траекторию движения частиц из-за их неправильной формы, исследовали место подачи удобрений на рабочий орган как основной фактор, оказывающий влияние на их распределение по поверхности поля [17].

³ Токарев И. В. Анализ технических средств для внутрипочвенного внесения гранулированных минеральных удобрений // Молодой ученый. 2019. № 48 (286). С. 89–91. URL: <https://moluch.ru/archive/286/64412/> (дата обращения: 06.10.2023).

⁴ Сычев В. Г. Динамика изменения, пути воспроизводства и совершенствование методов оценки плодородия почв Европейской части России : дис. ... д-ра сельхоз. наук. М., 2000. 328 с.

⁵ Кленин Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М. : Колос, 2003. 464 с.

⁶ Белинский А. В. Разработка теории и технических средств для поверхностного внесения минеральных удобрений и мелиорантов : дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2005. 398 с.



Р и с. 1. Суммарные издержки от неравномерного внесения минеральных удобрений
F i g. 1. Total costs from non-uniform application of mineral fertilizers

Согласно мнению Кулешова В. М., для повышения качества внесения минеральных удобрений достаточно использовать концентрированные туки, обладающие высокими физико-механическими свойствами, с однородными по размеру частицами⁷.

Однако, по статистике, большая часть используемых в сельскохозяйственном производстве удобрений вследствие разных причин не соответствует вышеуказанным требованиям. Поэтому, по мнению ряда ученых, такие составы лучше вносить устройствами, оказывающими пневмомеханическое воздействие на частицы вносимого материала [10; 22].

Материалы и методы

Из анализа литературных источников следует, что основными факторами, влияющими на процесс внесения минеральных удобрений, являются аэродинамические свойства гранул⁸ и их масса. Так, при равных условиях более крупные частицы, сойдя с рабочего органа, совершают свободный полет в воздушной среде и летят дальше, чем мелкие (пылевидные), распределение которых происходит

⁷ Кулешов М. С. Технология и штанговая машина для внесения твердых минеральных удобрений : дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2016. 166 с.

⁸ Анализ аэродинамических свойств минеральных удобрений / Ю. Н. Рогальская [и др.] // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. Ч. 2. (24–25 октября 2019 г., г. Минск). Минск : БГАТУ, 2019. С. 84–85. URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/9564> (дата обращения: 06.10.2023).

в непосредственной близости от исполнительного элемента (рабочего органа). Все это приводит не только к увеличению неравномерности внесения удобрений, но и к снижению производительности машин в связи с уменьшением рабочей ширины захвата агрегата⁹.

Если вносить удобрения, неоднородные по своей структуре, с использованием энергии воздушного потока, то дальность полета мелких частиц, по сравнению с крупными, обладающими большей массой, наоборот, увеличится.

Следовательно, для увеличения качества внесения минеральных удобрений с разным гранулометрическим составом необходима комбинация механического и пневматического воздействия на частицы вносимого материала [23].

На основании вышеизложенного нами разработана экспериментальная лабораторно-полевая установка (рис. 2), состоящая из бункера для минеральных и известковых удобрений 1, приводных элементов 2 и рабочего модуля, основными органами которого являются центробежный диск 3 и лопастной вентилятор 4, закрытый кожухом. Привод диска и лопастного вентилятора осуществляется от вала отбора мощности (ВОМ) трактора. Отличительной особенностью привода является то, что частота вращения диска и вентилятора различны благодаря наличию дополнительного редуктора.

Конструктивное решение исполнительного элемента, используемого в данной установке, подтверждено патентом РФ на полезную модель [24; 25].



Р и с. 2. Экспериментальная лабораторно-полевая установка:

1 – бункер; 2 – элементы привода; 3 – центробежный диск; 4 – лопастной вентилятор

F i g. 2. Experimental laboratory-field installation:

1 – bunker; 2 – drive elements; 3 – centrifugal disk; 4 – blade fan

⁹ Седашкин А. Н., Костригин А. А., Милюшина Е. А. Пневмоцентробежный аппарат для внесения известковых удобрений // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (22 ноября 2019 г., г. Саранск). Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2018. С. 42–46. EDN: YUGDRR

Процесс работы экспериментальной установки протекает следующим образом. На первом этапе удобрения из бункера самотеком подаются на вершину конуса центробежного рабочего органа и вдоль неё направляются к лопастям диска. На втором этапе в точке схода с диска частицы удобрений, получив некое ускорение, дополнительно подхватываются воздушным потоком, создаваемым лопастным вентилятором, и распределяются по поверхности поля. Скорость воздушного потока регулируется в зависимости от гранулометрического состава вносимого материала, но не ниже скорости схода частиц с плоского диска.

Результаты исследования

Общая кинетическая энергия, сообщаемая частице в момент схода с центробежного рабочего органа, составит:

$$E_{\text{общ}} = E_{\text{ц.д.}} + E_{\text{в.п.}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ц.д.}}$ – кинетическая энергия центробежного диска, Дж; $E_{\text{в.п.}}$ – кинетическая энергия воздушного потока, Дж.

На первом этапе перемещение частиц минеральных удобрений по рабочему органу происходит за счет кинетической энергии центробежного диска, которую можно представить в виде суммы двух движений: поступательного – со скоростью v_n , равной скорости центра инерции; и вращательного – с угловой скоростью ω вокруг мгновенной оси, проходящей через центр инерции¹⁰:

$$E_{\text{ц.д.}} = \frac{mv_n^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (2)$$

где J – момент инерции частицы относительно оси вращения, проходящей через его центр масс, кг/м².

Учитывая, что

$$\omega = \frac{v_{\text{окр.}}}{R}, \quad (3)$$

где $v_{\text{окр.}}$ – окружная скорость центробежного диска, м/с; R – радиус центробежного диска, м; выражение (2) примет вид:

$$E_{\text{ц.д.}} = \frac{mv_n^2}{2} + \frac{Jv_{\text{окр.}}^2}{2R^2}. \quad (4)$$

На втором этапе на частицы удобрений воздействует воздушный поток, который, как и любое движущееся тело, обладает кинетической энергией, равной

$$E_{\text{в.п.}} = \frac{\rho V v_{\text{в.п.}}^2 \kappa}{2}, \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; V – объем воздушного потока, м³; $v_{\text{в.п.}}$ – скорость воздушного потока, м/с; κ – поправочный коэффициент.

¹⁰ Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики : Учеб. пособие для вузов. 4-е изд., испр. М. : Высшая школа, 2002. 718 с.

Значение поправочного коэффициента учета колебаний скорости воздушного потока κ определяют либо экспериментально, либо с помощью специальных ресурсов.

В итоге общая кинетическая энергия, сообщаемая частице при сходе с рабочего органа, будет равна

$$E_{\text{общ.}} = \frac{mv_n^2}{2} + \frac{Jv_{\text{окр.}}^2}{2R^2} + \frac{\rho V v_{\text{в.п.}}^2 \kappa}{2}. \quad (6)$$

Из выражения (4) следует, что кинетическая энергия и, как следствие, дальность полета частиц минеральных удобрений зависят от абсолютной скорости v_a ($\bar{v}_a = \bar{v}_n + \bar{v}_{\text{окр.}} + \bar{v}_{\text{в.п.}}$).

Предварительные испытания агрегата, оснащенного экспериментальным рабочим органом, проводили при симметричной схеме внесения удобрений согласно действующему ГОСТ 28714-2007¹¹.

За неравномерность распределения удобрений на общей и рабочей ширине внесения принимали коэффициент вариации массы удобрений, попавшей в отдельные контейнеры размером 1,00×0,25×0,15 м, установленные на общую ширину в сплошной ряд перпендикулярно к направлению движения машинно-тракторного агрегата (рис. 3).

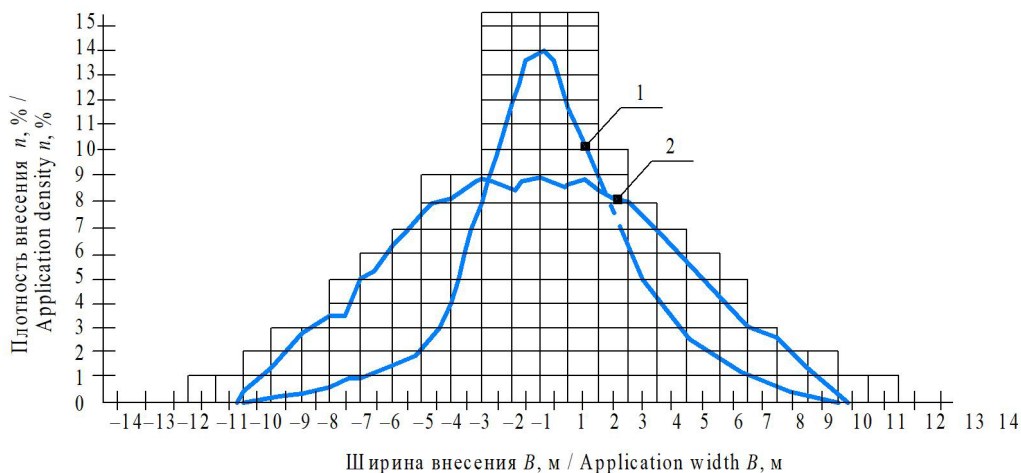


Р и с. 3. Фрагмент экспериментальных исследований

F i g. 3. Fragment of experimental studies

¹¹ ГОСТ 28714-2007. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний : дата введения 2009-01-01. М. : Стандартиформ, 2008. 39 с.

Результаты исследований (на примере внесения нитрофоски) представлены на рисунке 4.



Р и с. 4. Характер распределения нитрофоски:
1 – серийный агрегат; 2 – экспериментальный агрегат

Fig. 4. The nature of the distribution of nitrophoska: 1 – serial unit; 2 – experimental unit

Исходя из результатов (рис. 4) предварительных исследований характера распределения нитрофоски экспериментальным агрегатом, делаем вывод: благодаря наличию воздушного потока произошло перераспределение части пылевидных частиц с центральной зоны к периферии.

Обсуждение и заключение

В результате проведенных исследований обоснована конструкция пневмоцентробежного рабочего органа.

Использование разработанных пневмоцентробежных рабочих органов позволяет увеличить равномерность распределения минеральных и известковых удобрений за счет перераспределения части мелких частиц от центральной зоны к периферии. Благодаря данному факту, равномерность распределения повышается на 17,6 %. Рабочая ширина внесения при этом практически не меняется, так как по краям сектора рассева располагаются более крупные частицы, дальность полета которых зависит в основном от энергии, сообщаемой центробежным диском.

В зависимости от характеристик вносимого материала для достижения необходимого разгона частиц могут быть использованы различные комбинации конструктивно-технологических параметров как центробежного рабочего органа, так и лопастного вентилятора.

Таким образом, оснащение серийных машин для внесения минеральных удобрений разработанными пневмоцентробежными рабочими органами позволит расширить спектр их применения.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милюткин В. А., Овчинников В. А. Повышение урожайности и качества зерна озимой пшеницы за счет применения инновационных удобрений и сельхозмашин // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 52–67. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>
2. Личман Г. И., Белых С. А., Марченко А. Н. Способы внесения удобрений в системе точного земледелия // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 4. С. 4–9. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9>
3. Осипов А. И. Роль удобрений в плодородии почв и питании растений // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2020. Т. 15, № 2. С. 874–887. EDN: GCRYKZ
4. The Effect of Different Organic Fertilizers on Yield and Soil and Crop Nutrient Concentrations / C. L. Thomas [et al.] // Agronomy. 2019. Vol. 9, Issue 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
5. Кирюшин В. И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070062>
6. Кирюшин В. И. Научные предпосылки оптимизации использования земельных ресурсов // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 4. С. 7–10. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/7-10>
7. Иванов А. И. Инновационные приоритеты в развитии систем земледелия в России // Плодородие. 2011. № 4 (61). С. 2–6. EDN: NUSCSN
8. Сычев В. Г., Лунев М. И., Павлихина А. В. Современное состояние и динамика плодородия пахотных почв России // Плодородие. 2012. № 4 (67). С. 5–7. EDN: PEVAWH
9. Высоцкая Н. А. Основные физико-химические и структурно-механические свойства гранулированных минеральных удобрений // Горная механика и машиностроение. 2021. № 3. С. 59–65. EDN: YCFVEY
10. Седашкин А. Н., Костригин А. А., Драгунов А. В. Универсальный пневмоцентробежный рабочий орган для внесения мелиорантов // Сельский механизатор. 2018. № 1. С. 6–7. EDN: YRPGOU
11. Агрегат для внесения пылящихся известковых удобрений / А. Н. Седашкин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 6. С. 17–21. EDN: YUKBRJ
12. Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования / В. А. Овчинников [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 222–234. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>
13. Innovative Technologies and Equipment from “Amazone” Company for Fertilizer Application / V. Buxmann [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 210. Article no. 04002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004002>
14. Адамчук В. В., Моисеенко В. К. Технические средства нового поколения для посева минеральных удобрений // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 2. С. 15–19. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040207.htm> (дата обращения: 06.10.2023).
15. Овчинников В. А., Овчинникова А. В. Рабочий орган для внесения минеральных удобрений // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 13–16. EDN: WDOWBN
16. Model for Simulation of Particle Flow on a Centrifugal Fertiliser Spreader / E. Dintwa [et al.] // Biosystems Engineering. 2004. Vol. 87, Issue 4. P. 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.12.009>
17. Kweon G., Grift T. E. Feed Gate Adaptation of a Spinner Spreader for Uniformity Control // Journal of Biosystems Engineering. 2006. Vol. 95, Issue 1. P. 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.05.003>
18. Analysis and Control of Uniformity by the Feed Gate Adaptation of a Granular Spreader / G. Kweon [et al.] // Journal of Biosystems Engineering. 2009. Vol. 34, Issue 2. P. 95–105. <https://doi.org/10.5307/JBE.2009.34.2.095>

19. Адаптивный пневмоцентробежный модуль к машинам для внесения минеральных и известковых удобрений / В. А. Овчинников [и др.] // Сельский механизатор. 2021. № 11. С. 8–9. EDN: [VISBRE](#)
20. Адамчук В. В. Теоретические исследования движения частиц удобрений по рассеивающему органу // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2003. № 12. С. 28–31.
21. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений / Н. С. Панферов [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 12 (294). С. 18–24. EDN: [VPGWSS](#)
22. Батурин В. А., Личман Г. И. Обоснование параметров пневмосистемы машины для дифференцированного внесения минеральных удобрений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 6. С. 26–30.
23. Милюшина Е. А., Седашкин А. Н., Костригин А. А. Движение частиц удобрений, сходящих с пневмоцентробежного аппарата в режиме разгона // Сельский механизатор. 2022. № 2. С. 10–11. EDN: [ZEADYM](#)
24. Адаптивный пневмоцентробежный модуль машины для внесения минеральных и известковых удобрений : патент 217443 Российская Федерация / Овчинников В. А. [и др.]. № 2023101821 ; заявл. 27.01.2023 ; опубл. 31.03.2023. 5 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f0/8b/bd/af4b48c1992ab6/RU217443U1.pdf> (дата обращения: 06.10.2023).
25. Пневмоцентробежный рабочий орган машины для внесения минеральных и известковых удобрений : патент 201318 Российская Федерация / В. А. Овчинников [и др.]. № 2020133322 ; заявл. 09.10.2020 ; опубл. 09.12.2020. 5 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU201318U1_20201209.pdf (дата обращения: 06.10.2023).

Поступила в редакцию 07.11.2023; поступила после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 26.12.2023

Об авторах:

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

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

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

Зыкин Евгений Сергеевич, директор Технологического института-филиала Ульяновского ГАУ (433511, Российская Федерация, г. Димитровград, ул. Куйбышева, д. 310), доктор технических наук, доцент, профессор кафедры агротехнологий, машин и безопасности жизнедеятельности Ульяновского ГАУ (432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-6865>, Researcher ID: [AAM-5482-2021](#), evg-zykin@yandex.ru

Тюрин Игорь Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий продуктов питания Вавиловского университета (410012, г. Саратов, пр-т им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8587-4422>, Researcher ID: [HIR-1337-2022](#), ig.tyurin@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

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

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

А. Д. Комолов – проведение лабораторных исследований, визуализация текста.

Е. С. Зыкин – критический анализ.

И. Ю. Тюрин – литературный и патентный анализ, обработка результатов исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Milyutkin V.A., Ovchinnikov V.A. Increasing the Yield and Quality of Winter Wheat Grain Through the Use of Innovative Fertilizers and Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):52–67. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>
2. Lichman G.I., Belykh S.A., Marchenko A.N. Methods of Applying Fertilizers in Precision Agriculture. *Agricultural Machines and Technologies*. 2018;12(4):4–9. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9>
3. Osipov A.I. The Role of Fertilizers in Soil Fertility and Plant Nutrition. *Zdorove – Osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya*. 2020;15(2):874–887. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: GCRYKZ
4. Thomas C.L., Acquah G.E., Whitmore A. P., McGrath S.P., Haefele S.M. The Effect of Different Organic Fertilizers on Yield and Soil and Crop Nutrient Concentrations. *Agronomy*. 2019;9(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
5. Kiryushin V.I. The Management of Soil Fertility and Agroecosystem Productivity in Landscape Adaptive Agricultural Systems. *Pochvovedenie*. 2019;(9):1130–1139. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070062>
6. Kiryushin V.I. [Scientific Prerequisites for Optimizing the Use of Land Resources]. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019(4):7–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/7-10>
7. Ivanov A.I. Innovative Priorities in the Development of Agriculture Systems in Russia. *Plodородie*. 2011;(4):2–6. (In Russ.) EDN: NUSCSN
8. Sychev V.G., Lunev M.I., Pavlikhina A.V. Current State and Dynamics of Arable Land Fertility in Russia. *Plodородie*. 2012(4):5–7. (In Russ.) EDN: PEVAWH
9. Vysotskaya N.A. Basic Physical-Chemical and Structural-Mechanical Properties of Granular Mineral Fertilizers. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*. 2021;(3):59–65. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YCFVEY
10. Sedashkin A.N., Kostigrin A.A., Dragunov A.V. Universal Pneumatic Centrifugal Working Body for Introducing Ameliorants. *Selskiy Mechanizator*. 2018;(1):6–7. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YRPGOU
11. Sedashkin A.N., Mityushina E.A., Kostigrin A.A., Dragunov A.V. The Unit for Making Dusty Lime Fertilizers. *Tractory i selkhoz mashiny*. 2018;(6):17–21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YUKBRJ
12. Ovchinnikov V.A., Kilmyashkin E.A., Knyazkov A.S., Ovchinnikova A.V., Zhaltin N.A., Zykina E.S. Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>
13. Buxmann V., Meskhi B., Mozgovoy A., Rudoy D., Olshevskaya A. Innovative Technologies and Equipment from “Amazon” Company for Fertilizer Application. *E3S Web of Conferences*. 2020;210:04002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004002>

14. Adamchuk V.V., Moiseenko V.K. [Technical Means of a New Generation for Applying Mineral Fertilizers]. *Traktory i selskohozyajstvennyye mashiny*. 2004;(2):15–19. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040207.htm> (accessed 06.10.2023). (In Russ.)
15. Ovchinnikov V.A., Ovchinnikova A.V. The Working Body for the Application of Mineral Fertilizers. *Traktory i Selkhoz mashiny*. 2018(2):13–16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WDOWBN**
16. Dintwa E., Van Liedekerke P., Olieslagers R., Tijssens E., Ramon H. Model for Simulation of Particle Flow on a Centrifugal Fertiliser Spreader. *Biosystems Engineering*. 2004. 87;(4):407–415. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.12.009>
17. Kweon G., Grift T.E. Feed Gate Adaptation of a Spinner Spreader for Uniformity Control. *Biosystems Engineering*. 2006;95(1):19–34. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.05.003>
18. Kweon G., Grift T.E., Miclet D. Analysis and Control of Uniformity by the Feed Gate Adaptation of a Granular Spreader. *Journal of Biosystems Engineering*. 2009;34(2):95–105. <https://doi.org/10.5307/JBE.2009.34.2.095>
19. Ovchinnikov V.A., Zhalnin N.A., Zhalnin A.A., Ovchinnikova A.V., Bazhanov D.V. Adaptive Pneumatic Centrifugal Module for Machines for Applying Mineral and Lime Fertilizers. *Selskiy mekhanizator*. 2021;(11):8–9. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **VISBRE**
20. Adamchuk V.V. Theoretical studies of the movement of fertilizer particles along the scattering organ. *Traktory i selskohozyajstvennyye mashiny*. 2003. № 12. P. 28–31.
21. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., Blagov D.A., Plekhanov, S.A., Sukhorukov D.G. Trends in the Development of Machines with Centrifugal Working Bodies for Surface Application of Solid Mineral Fertilizers. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(12):18–24. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **VPGWSS**
22. Baturin V.A., Lichman G.I. Justification of the Parameters of the Pneumatic System of the Machine for Differentiated Application of Mineral Fertilizers. *Agricultural Machines and Technologies*. 2011;(6):26–30.
23. Milyushina E.A., Sedashkin A.N., Kostrigin A.A. The Movement of Fertilizer Particles Coming Off the Pneumatic Center Machine in Acceleration Mode. *Selskiy mekhanizator*. 2022(2):10–11. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **ZEADYM**
24. Ovchinnikov V.A., Zhalnin N.A., Zhalnin A.A., Ovchinnikova A.V., Kupryashkin V.V., Antipov Yu.A. [Adaptive Pneumatic Centrifugal Module of Machines for Applying Mineral and Lime Fertilizers]. Patent 217,443 Russian Federation. 2023 March 31. 5 p. Available at: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=217443&TypeFile=html (accessed 06.10.2023). (In Russ.)
25. Ovchinnikov V.A., Zhalnin N.A., Sedashkin A.N., Ovchinnikova A.V. [Pneumatic Centrifugal Working Body of a Machine for Applying Mineral and Lime Fertilizers]. Patent 201,318 Russian Federation. 2020 December 09. 5 p. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=201318&TypeFile=html (accessed 06.10.2023). (In Russ.)

Submitted 07.11.2023; revised 11.12.2023; accepted 26.12.2023

About the authors:

Vladimir A. Ovchinnikov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: orcid.org/0000-0003-0350-8478, Researcher ID: **O-6834-2018**, ovchinnikovv81@yandex.ru

Nikolay A. Zhalnin, Lecturer of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshhevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: orcid.org/0000-0003-4307-4619, Researcher ID: **AGD-2904-2022**, nik.zhalnin2015@yandex.ru



Artem D. Komolov, Postgraduate Student of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0290-1553>, Researcher ID: [IAQ-9674-2023](https://orcid.org/0009-0001-0290-1553), komoartyom@yandex.ru

Evgeny S. Zykin, Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Director of the Technological Institute-Branch of Ulyanovsk State Agrarian University (310 Kuibyshev St., Dimitrovgrad 433511, Russian Federation), Professor of the Chair of Agrotechnologies, Machines and Life Safety, Ulyanovsk State Agrarian University (Novy Venets Boulevard, Ulyanovsk 1432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-6865>, Researcher ID: [AAM-5482-2021](https://orcid.org/0000-0002-4795-6865), evg-zykin@yandex.ru

Igor Yu. Tyurin, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Food Technologies, Saratov State Vavilov Agrarian University (4, Structure 3 Prospekt im. Peter Stolypin, Saratov 410012, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8587-4422>, Researcher ID: [HIR-1337-2022](https://orcid.org/0000-0002-8587-4422), ig.tyurin@yandex.ru

Authors contribution:

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

N. A. Zhalnin – literary and patent analysis, laboratory studies, processing of experimental results, preparation of the initial version of the text and text editing.

A. D. Komolov – laboratory research, text visualization.

E. S. Zykin – critical analysis.

I. Yu. Tyurin – literary and patent analysis, processing of research results.

All authors have read and approved the final manuscript.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ / FOOD SYSTEMS

УДК 637.233.6

doi: 10.15507/2658-4123.034.202401.128-144


Оригинальная статья



Научно-технические основы разработки установки с индукционным нагревом для пастеризации молока

Е. Н. Неверов , А. А. Владимиров, П. С. Коротких,
Е. В. Николаева, А. Н. Порохнов

Кемеровский государственный университет
(г. Кемерово, Российская Федерация)

 neverov42@mail.ru

Аннотация

Введение. Индукционный нагрев является одной из предпочтительных технологий нагрева для промышленных, медицинских и бытовых систем, поскольку имеет ряд преимуществ перед традиционными методами передачи тепла. К достоинствам относятся энергоэффективность, быстрота нагрева, безопасность, чистота процесса, малая металлоемкость, а также простота конструкции и точный контроль температуры нагреваемого сырья. Особенно актуальна установка с индукционным нагревом для фермерских хозяйств, перерабатывающих молоко и производящих различные продукты на его основе.

Цель исследования. Создание установки длительной пастеризации молока с использованием нагреваемой индукционными токами емкости, а также подбор оптимальных условий работы созданного прототипа.

Материалы и методы. Для разработки основных узлов прототипа установки пастеризации молока с индукционным нагревом было применено 3D-моделирование в системе автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D». Емкость для сырья, мешалка и крышка изготовлены из нержавеющей стали марок AISI 304 и AISI 430. Индуктор представляет собой каркас из полимерного материала со спиралевидно расположенным в нем литцендротом. Корпус прототипа установки изготовлен из алюминиевого композитного материала. Разработка и отладка электронной схемы силовой части прототипа устройства проводилась в программе для проектирования Proteus 7.10. Для изготовления силовой части блока генерации электромагнитной индукции использовался микроконтроллер Mega 2560. Контроль регулируемой температуры осуществлялся с помощью водонепроницаемого датчика температуры DS18B20. Для визуализации распространения теплового поля по поверхности стенок емкости применялся тепловизор.

Результаты исследования. Приведен внешний вид схемы прототипа разрабатываемого устройства длительной пастеризации молока с индукционным нагревом объемом 75 л. Дано обоснование в составе установки необходимых элементов и исполнительных механизмов для пастеризации молока в емкости, нагреваемой индукционными токами. Приведены схема разработанной силовой части установки и результаты ее испытаний

© Неверов Е. Н., Владимиров А. А., Коротких П. С., Николаева Е. В., Порохнов А. Н., 2024



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

при нагреве емкостей из различных материалов. Также в результате данного исследования разработан алгоритм для управления работой и PID-регулирования процесса пастеризации молока в экспериментальной установке на базе микрокомпьютера Raspberry Pi. Приведены графики переходных процессов при изменении коэффициентов PID-регулирования температуры.

Обсуждение и заключение. В ходе испытаний принципа индукционного нагрева на нержавеющей стали разного состава сделан вывод, что для эффективности нагрева емкости необходима накладка из ферромагнитной стали, навариваемая поверх основной емкости из пищевой нержавеющей стали. Разработанная система индукторов позволила создать прототип установки с двумя зонами нагрева в зависимости от объема обрабатываемого сырья, что актуально для малых крестьянских фермерских хозяйств, занимающихся переработкой молока и производством продуктов питания на его основе.

Ключевые слова: автоматизация, пастеризатор, индукционный нагрев, молоко, микрокомпьютер, индуктор

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Научно-технические основы разработки установки с индукционным нагревом для пастеризации молока / Е. Н. Неверов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 128–144. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>

Original article

Scientific and Technical Basis for the Development of an Induction Heating Unit for Milk Pasteurization

E. N. Neverov , A. A. Vladimirov, P. S. Korotkih,
E. V. Nikolaeva, A. N. Porokhnov

*Kemerovo State University
(Kemerovo, Russian Federation)*

 neverov42@mail.ru

Abstract

Introduction. Induction heating is a preferred heating technique for industrial, medical and consumer systems, because it has a number of advantages over traditional heat transfer methods. The advantages include energy efficiency, heating rate, safety of operation, cleanliness of the process, low metal consumption, simple design, and precise control of the temperature of the heated raw materials. An induction heating unit is especially important for farms involved in processing of milk and producing milk-based products.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a prototype unit for long-term pasteurization of milk using a container heated by induction currents and at selecting optimal operating conditions for the developed prototype unit.

Materials and Methods. There was used 3D modeling in the KOMPAS-3D computer-aided design system to develop the main components of a milk pasteurization prototype unit with induction heating. The container for raw materials, stirrer and lid are made of stainless steel AISI 304 and AISI 430. The inductor is a frame made of polymer material with a litz wire arranged in a spiral manner. The body of the prototype unit is made of aluminum composite material. The developing and debugging of the electronic circuit of the prototype unit power part was carried out with the use of the design program Proteus 7.10. The microcontroller Mega 2560 was used to make the power part of the electromagnetic induction generation unit. The controlled temperature was monitored by using the waterproof temperature sensor DS18B20. A thermal imager was used to visualize the propagation of the thermal field over the surface of the container walls.

Results. The structure diagram of the developed prototype unit with induction heating for long-term pasteurization of milk is presented. The article gives grounds to the use of the necessary elements and actuators in the unit for pasteurization of milk in a container heated by induction currents. There are presented a diagram of the developed power part for the prototype unit and the results of testing it when heating containers made of various materials. An algorithm has been developed to control the operation and PID regulation of the milk pasteurization in an experimental unit with the use the Raspberry Pi microcomputer. The graphs of transient processes when changing the coefficients of PID temperature control are presented.

Discussion and Conclusion. When testing the induction heating principle on stainless steels of different compositions, it has been concluded that for the efficiency of heating the container, there is required a ferromagnetic steel pad welded on top of the main container made of food-grade stainless steel. The developed system of inductors made it possible to create a prototype unit with two heating zones depending on the volume of processed raw materials that is important for small farms engaged in processing milk and producing milk-based products.

Keywords: automation, pasteurizer, induction heating, milk, microcomputer, inductor

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

For citation: Neverov E.N., Vladimirov A.A., Korotkih P.S., Nikolaeva E.V., Porokhnov A.N. Scientific and Technical Basis for the Development of an Induction Heating Unit for Milk Pasteurization. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):128–144. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>

Введение

Традиционным методом, используемым для термической обработки жидких пищевых продуктов, является пастеризация, технология которой разрабатывалась десятилетиями и является эффективным и экономичным методом обработки в пищевой промышленности. Эти методы в основном основаны на конвективной и кондуктивной передаче тепла, при которой тепловая энергия передается от горячей среды к более холодному продукту, что приводит к большим температурным градиентам.

Для термической обработки пищевого сырья (молока, сока, морса, джема и др.) в пищевой промышленности применяют установки с промежуточным теплоносителем. Так, наиболее распространенными промежуточными носителями являются водяной пар или вода, которые усложняют конструкцию. Из-за этого возникают сложности с автоматизацией технологического процесса, увеличиваются масса и габариты установки, требуются затраты на обслуживания дополнительного оборудования, например, парового котла. Также непосредственно перед тепловой обработкой самого сырья необходима энергия для получения пара или нагрева воды. По этой причине в настоящее время продолжается разработка высокоэффективных устройств с улучшенными техническими характеристиками.

Обзор литературы

Такие технологии обработки продуктов как ультразвуковая [1; 2], инфракрасным и ультрафиолетовым облучениями [3; 4], кавитация [5], высоким давлением [6], солнечной энергией [7] и другие [8; 9] не получили широкого распространения или находятся на стадии исследования и разработки. Также при поиске новых способов пастеризации важно учитывать их влияние на компоненты пищевого сырья, пищевую ценность и биологически активные соединения. В работе [10]

авторами приведены нетермические методы пастеризации и стерилизации молока, а также их воздействие на микроорганизмы, биологические вещества и физико-химические свойства продукта.

Перспективным методом кондуктивной передачи тепла является магнитно-индукционный нагрев, который широко применяется в быту [11; 12], в пищевой и металлургической промышленности [13; 14], а также в дорожном строительстве [15].

Использование такого метода нагрева демонстрирует в процессе пастеризации высокую энергоэффективность, быстрый нагрев, безопасность, чистоту, малую металлоемкость, простоту конструкции и точный контроль температуры нагреваемого сырья. Как бесконтактный метод прямого нагрева материала он основан на джоулевом нагреве и магнитном гистерезисе. Данные механизмы вызывают нагрев за счет неравномерного распределения тока в области проводящего материала из-за образования переменного магнитного поля.

В работах [16; 17] приведено обоснование конструктивных параметров для проточного пастеризатора индукционного типа с выдерживателем. Однако рабочая частота данного пастеризатора составляет 50 Гц, и его конструкция предполагает использование в промышленных масштабах.

А. А. Багаев и С. О. Бобровский [18] на основе энергетического и эксенергетического анализа, сравнив пастеризаторы молока типа «водяной пар – молоко», пастеризатор индукционного типа и пастеризатор термосифонного типа, отметили, что перспективным направлением исследований является совершенствование установки с индукционным принципом работы. Зарубежные авторы [19] в своем исследовании по термической обработке 500 л клубничного джема установили, что для системы с индукционным нагревателем затрачивается меньше энергии и эксенергии, нежели для системы электрического нагревателя с водяной рубашкой.

Преимущества индукционного нагрева и его влияние на физико-химические свойства продукта показаны в работах, описывающих стерилизацию сока киви [20], яблочного сока [21], пастеризацию сока гуавы [22], томатной пасты [23], яичных белков [24]. Авторами исследования [25] показана эффективность внедрения технологии индукционного нагрева при пастеризации молока на заводе.

В работах [26–28] описываются универсальные индукционные системы, которые применяются в пищевой промышленности. В таких системах в качестве основных элементов используются индукционные катушки, блок питания высоковольтного генератора, микроконтроллер и колебательный контур.

С целью повышения эффективности управления работой аппаратов пищевых производств в различных технологических процессах авторами в работах [29] используется автоматизация, которая позволяет освободить человека от выполнения рутинных задач, повышая производительность его труда. Кроме того, автоматические устройства минимизирует участие человека в том или ином процессе, минимизируют вероятность ошибки в определении различных величин. Автоматические системы гораздо точнее и своевременнее реагируют на изменения тех или иных параметров.

Автоматизация технологических процессов с использованием PID-контроллера на базе микрокомпьютера, описываемая в работах [30–31], является не просто полезной, но и незаменимой в предлагаемых случаях, когда необходимо учитывать большое количество параметров технологического процесса и максимально точно их поддерживать в пределах задаваемых величин.

В исследованиях [32–34] описываются устройства пастеризации молока с использованием PID-контроллера, где в отличие от ручного или автоматического управления PID-регулирование позволяет повысить качество пастеризованного молока и с более высокой вероятностью уничтожить бактерии, которые находятся в сыром молоке.

Материалы и методы

Основной частью прототипа установки является резонансный колебательный LC-контур, в состав которого входит емкость пастеризации, индукторы, отвечающие за нагрев установки, и силовая часть.

В качестве материала для изготовления емкости, мешалки и крышки была выбрана используемая для производства пищевого оборудования нержавеющая сталь марки AISI 304 (российский аналог по ГОСТу – сталь марки 08X18H10) аустенитного класса с толщиной стенок 2 мм. Она имеет удельное электрическое сопротивление 0,73 мкОм·м и относительную магнитную проницаемость около 0,8–1, что показывает отсутствие способности нержавеющей сталей к намагниченности в отличие от ферромагнитных. Токи Фуко, наводимые индуктором на поверхность металла, возникают в ферромагнитных материалах, поэтому для локализации места индукционного нагрева к емкости приварены пластины толщиной 2 мм из нержавеющей стали марки AISI 430 ферритного класса.

Индуктор представляет собой каркас со спиралевидно расположенным в нем проводом. Такое расположение оставляет на поверхности каркаса максимально возможное свободное пространство, совместимое с его размерами и числом витков для прохождения силовых линий магнитного поля. Также при таком расположении силовые линии переменного магнитного поля не пронизывают проводник, уменьшая явление самонагрева индуктора. При равномерном нагреве цилиндрической емкости для сырья каркас индуктора повторяет ее профиль.

Генерируемое переменное электромагнитное поле проходит через каркас и концентрируется на внешней поверхности накладки из ферритной нержавеющей стали. Таким образом, вихревые токи распределяются на поверхности накладок на цилиндрической емкости, и выделение тепла происходит в основном на площади по внешнему периметру индуктора.

В качестве провода для индуктора был выбран многожильный медный провод – литцендрат, поскольку он отличается высокой гибкостью и простотой укладывания. Также, как известно, при повышении частоты тока возникает скин-эффект, то есть происходит смещение тока к поверхности проводника, из-за которого увеличивается сопротивление. В литцендрате же ток проходит по поверхностному слою каждой жилы, таким образом увеличивается площадь протекания тока и уменьшаются потери.

Каркас для индуктора выполнен из полимерного материала, выбранного исходя из основного параметра – температуры эксплуатации. Данный каркас образу-

ет дополнительный слой, который исключает вероятность короткого замыкания литцендрата с металлической емкостью.

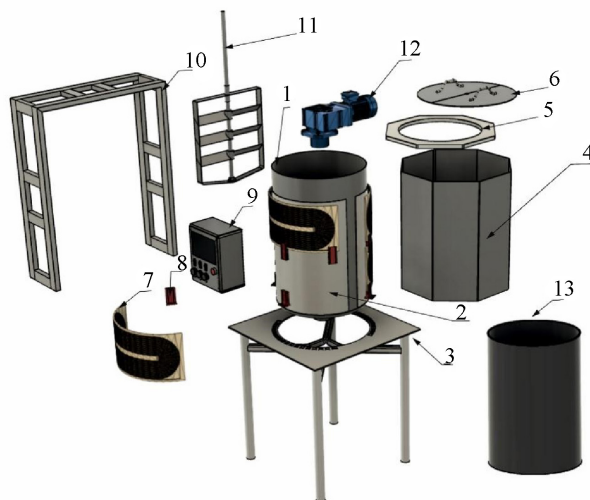
Корпус прототипа устройства пастеризации и силового блока изготовлен из алюминиевого композиционного материала. Для теплоизоляции емкости использовали гибкую каучуковую теплоизоляцию толщиной 6 мм.

Разработку основных элементов прототипа проводили с использованием 3D моделирования в системе автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D». Для изготовления основных элементов и узлов прототипа использовались современные лазерные фрезерные и аддитивные технологии. Разработку и отладку электронной схемы силовой части прототипа устройства авторы настоящего исследования проводили в программе для проектирования Proteus 7.10. Для изготовления силовой части блока генерации электромагнитной индукции использовали микроконтроллер Mega 2560 на базе платформ Arduino Mega 2560 и Iskra Mega. Контроль регулируемой температуры осуществлялся с помощью водонепроницаемого датчика температуры DS18B20, для визуализации распространения теплового поля по поверхности стенок емкости применяли тепловизор.

Для написания программ управления работой прототипа пастеризатора на языке программирования Python на микрокомпьютере Raspberry Pi использовалась среда разработки Thonny с соответствующими библиотеками.

Результаты исследования

Внешний вид схемы прототипа разрабатываемого устройства для пастеризации молока индукционного типа объемом 75 л представлен на рисунке 1.

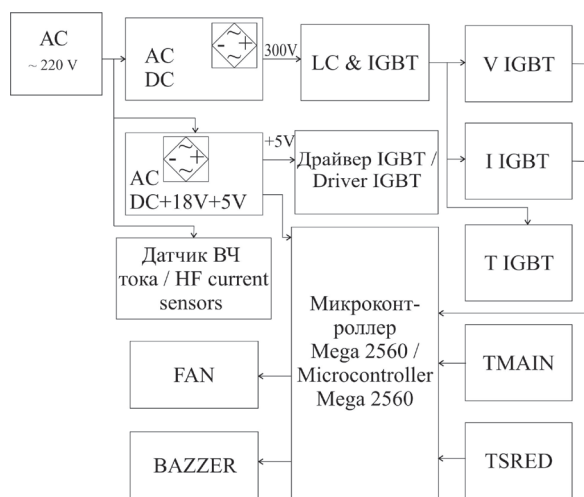


Р и с. 1. Схема прототипа пастеризатора: 1 – бак пастеризатора; 2 – ферромагнитные накладки; 3 – стол для размещения пастеризатора; 4 – корпус; 5 – элементы корпуса; 6 – крышка; 7 – индукторы; 8 – крепление индуктора; 9 – блок панели управления; 10 – стойка; 11 – мешалка; 12 – электромотор; 13 – теплоизоляционная рубашка

Fig. 1. Diagram of a pasteurizer prototype: 1 – pasteurizer tank; 2 – ferromagnetic pads; 3 – table for the pasteurizer; 4 – body; 5 – body elements; 6 – cover; 7 – inductors; 8 – inductor mounting; 9 – control panel block; 10 – stand; 11 – stirrer; 12 – electric motor; 13 – thermal insulation jacket

В ходе выполнения конструкторских работ было принято решение об использовании системы индукторов из двух параллельно соединенных пар. Такое расположение позволяет контролировать зону нагрева, допуская технически разработать установку пастеризации молока с разными областями нагрева в зависимости от объема обрабатываемого сырья, что актуально для малых крестьянских фермерских хозяйств, занимающихся переработкой молока и производством продуктов питания на его основе.

В процессе исследования была разработана силовая плата для сопряжения уровней сигналов в микроконтроллере (далее – МК), были созданы схемы драйвера ключей на полевых транзисторах IGBT. В основе силовой части прототипа устройства находится МК Mega 2560, который контролирует аналоговые сигналы датчика температуры среды (TSRED), датчика температуры емкости (TMAIN), датчика температуры с транзистора IGBT (TIGBT), задает сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления мощностью выходных транзисторов (PWM IGBT). МК при необходимости включает вентилятор охлаждения транзисторов IGBT (FAN) и в случае ошибки подает звуковой сигнал (BAZZER). На рисунке 2 показана функциональная блок-схема силового модуля прототипа устройства для пастеризации молока.

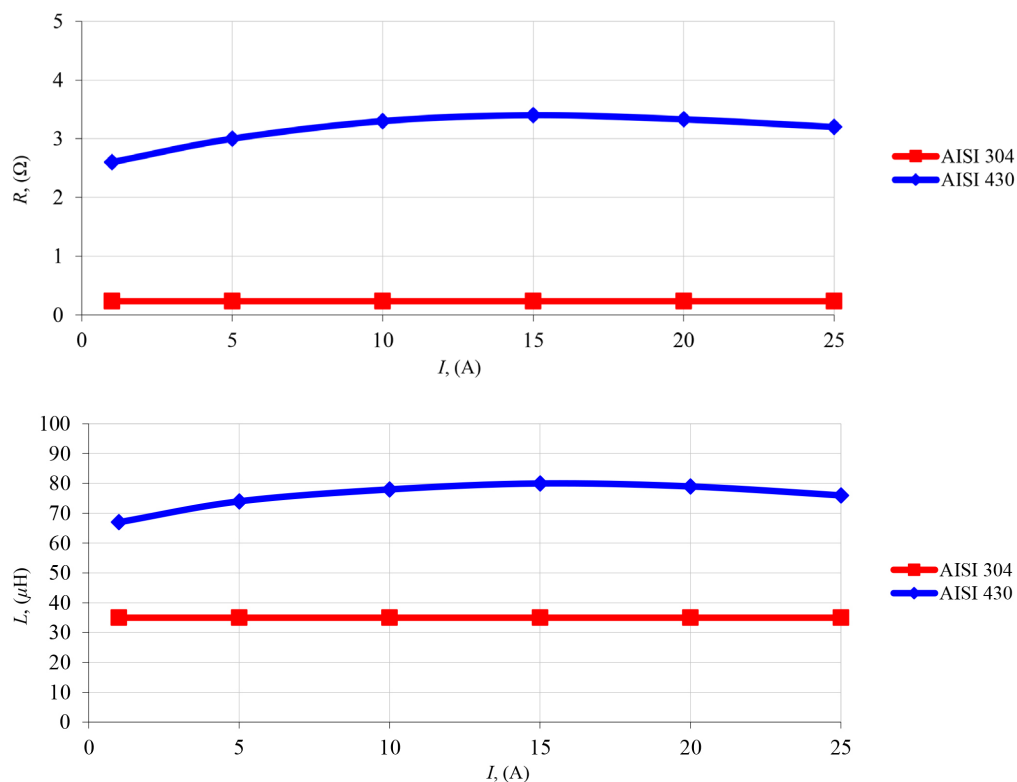


Р и с. 2. Функциональная блок-схема силового модуля прототипа пастеризатора с индукционным нагревом

F i g. 2. Functional block diagram of the power module of the prototype pasteurizer with induction heating

На плате питания вход переменного тока 220 В преобразуется в напряжение с максимальным значением до 300 В мостовым выпрямителем. В модуле ACDC добавляется 18 В и 5 В. LC-индуктор питается от источника до 300 В для создания магнитного поля и нагрева емкости пастеризации за счет Джоулева тепла.

Для обоснования выбора марки стали, необходимой для изготовления емкости и осуществления принципа индукционного нагрева, были проведены испытания генератора с использованием в качестве нагрузки емкости из нержавеющей стали разных марок. На рисунке 3 показаны результаты изменения сопротивлений и индуктивности при изменении силы от 1 до 25 А при фиксированном значении резонансной частоты $f = 40$ кГц на ферромагнитной (AISI 430) и неферромагнитной (AISI 304) емкостях.



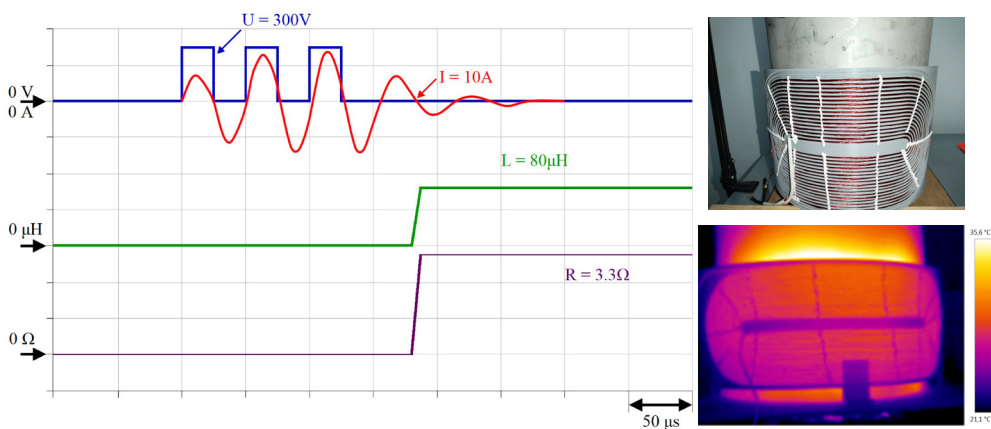
Р и с. 3. Графики изменения значения сопротивления (R) и индуктивности (L) при работе генератора с использованием нагрузки – емкости из разных материалов

F i g. 3. Graphs of changes in the value of resistance (R) and inductance (L) when the generator operates using a load – a container made of different materials

Неферромагнитная емкость не имеет гистерезисных потерь, но имеет относительный уровень магнитной проницаемости, приблизительно равный 1. Соответственно, на значения R и L неферромагнитного материала емкости не повлияли приложенные значения силы тока (по сравнению с ферромагнитным материалом).

На рисунке 4 показаны результаты испытаний работы пастеризатора с индукционным нагревом и с пустой емкостью при определенных значениях основных

величин U , R , L и I . Из рисунка видно, что по данным съемки с тепловизора Testo 875-1i идет эффективный нагрев стенок емкости, изготовленной из нержавеющей стали марки AISI 430.



Р и с. 4. Результаты испытаний работы пастеризатора с индукционным нагревом при оптимальных значениях основных величин U , R , L и I

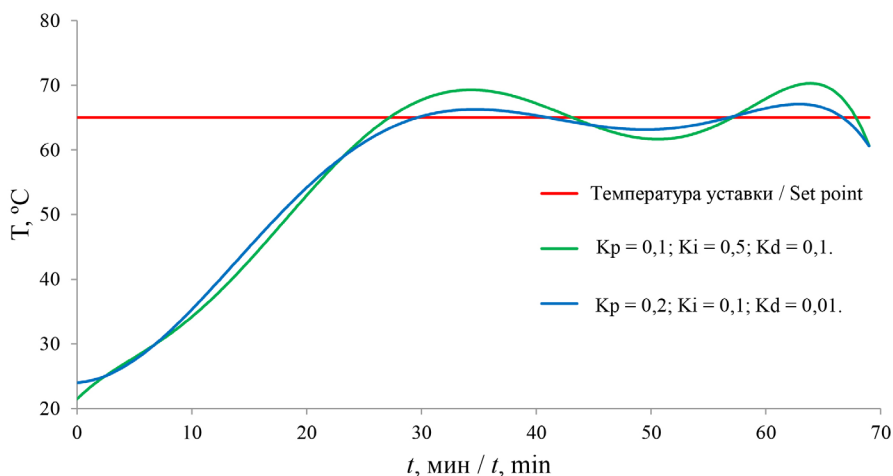
F i g. 4. Results of testing the operation of a pasteurizer with induction heating at optimal values of the main quantities U , R , L and I

Таким образом, в рабочем прототипе для получения эффективных температурных интервалов в разных областях емкости пастеризатора нами используется металлическая накладка из нержавеющей стали ферритного класса (AISI 430), навариваемая поверх основной емкости, изготовленной из пищевой нержавеющей стали (AISI 304).

Для управления работой установки PID-регулирования процесса пастеризации и для взаимодействия с различными его периферийными устройствами, датчиками, измеряющими различные параметры пастеризации молока, использовали микрокомпьютер Raspberry Pi. Сопряжение микрокомпьютера Raspberry Pi с Arduino Mega 2560 или Iskra Mega проводили с помощью интерфейса ввода и вывода общего назначения (GPIO). Данный интерфейс позволяет программам обмениваться с внешними по отношению к микрокомпьютеру устройствами низкоуровневыми цифровыми сигналами, устанавливать состояние ввода и вывода, а также уровень сигнала в момент чтения или записи.

На рисунке 5 указаны 2 различных переходных процесса регулирования температурой относительно задаваемой температуры уставки 65°C , необходимой для пастеризации 50 л сырья. Из эксперимента следует, что в течение 30 мин. происходит нагрев сырья до температуры уставки, далее установка переходит в режим выдержки. В первом случае подбора коэффициентов PID-регулирования наблюдается сильное увеличение статистической ошибки за

счет неоптимальных коэффициентов, температура после выхода на режим выдерживания ($65\text{ }^{\circ}\text{C}$) относительно уставки на $5\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышает заданное значение. Во втором случае регулирование происходит плавно, при оптимальных значениях коэффициентов PID-регулирования статистическая ошибка температуры не превышает $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.



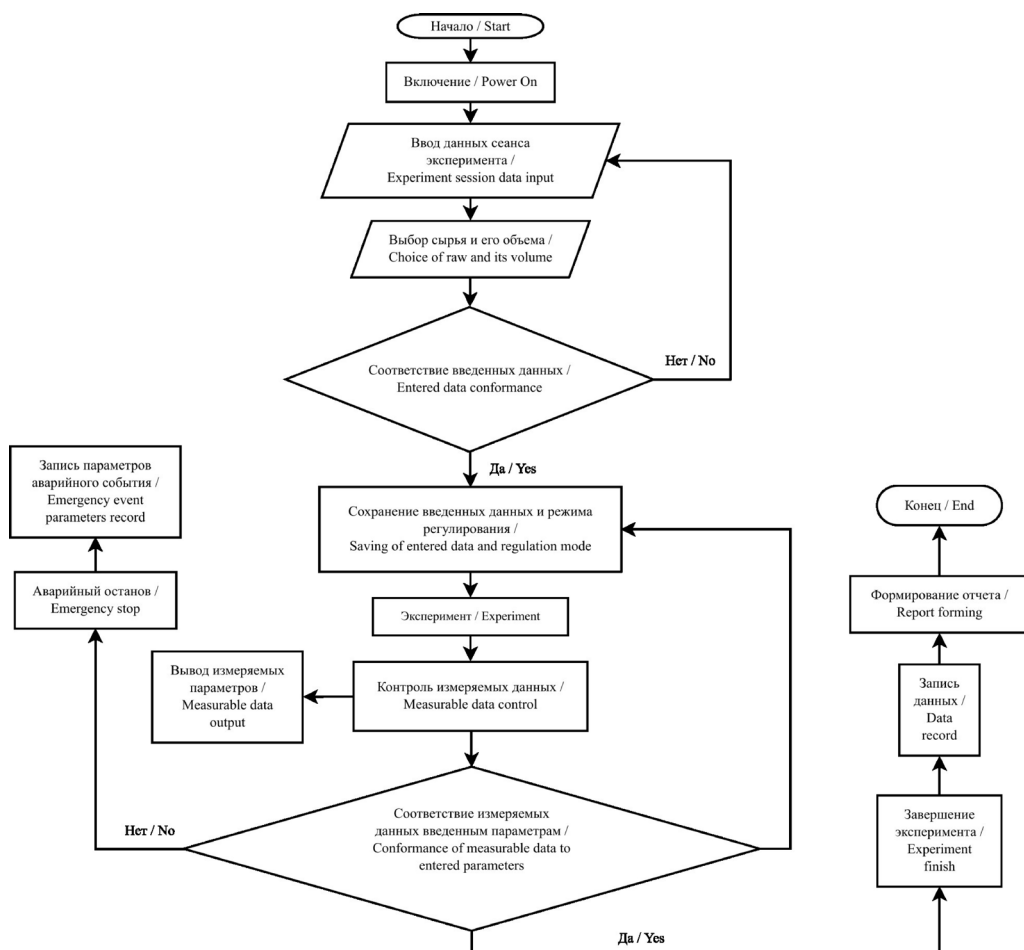
Р и с. 5. Графики переходных процессов при изменении коэффициентов PID-регулирования температуры

F i g. 5. Graphs of transient processes when changing PID temperature control coefficients

Алгоритм регулирования процессом пастеризации молока в экспериментальной установке представлен на рисунке 6. После включения установки проходит ее инициализация – проверка базовых параметров, несоответствие которых с предусмотренными значениями не позволяет проводить процесс пастеризации. Такими параметрами являются ток и напряжение питания, подаваемые на индуктор, а также скорость перемешивания и температура пастеризации. Если эти параметры не соответствуют предусмотренным значениям, установка перезапускается.

При соответствии введенных данных происходит запуск эксперимента пастеризации молока, следует постоянный анализ данных, получаемых с датчиков, и их вывод на экран панели управления.

Если на протяжении всего эксперимента все измеряемые данные не превышают допустимых пределов, эксперимент завершается в штатном режиме, данные записываются в файлы, а некоторые выводятся на экран. После окончания измерений в окно «Меню» выводится график зависимости температуры пастеризации от времени. После построения графика происходит его сохранение в формате изображения PNG, формируется отчет эксперимента.



Р и с. 6. Алгоритм регулирования процесса пастеризации молока в экспериментальной установке
F i g. 6. Algorithm for regulating the milk pasteurization process in an experimental unit

Обсуждение и заключение

Разработано конструктивное решение расположения основных элементов и узлов для установки длительной пастеризации молока с индукционным нагревом. В ходе испытаний принципа индукционного нагрева на нержавеющей стали разного состава AISI 304 и AISI 430 при выбранных значениях основных величин U , R , L и I и фиксированном значении резонансной частоты 40 кГц сделан вывод, что для осуществления возникновения индукционных токов на поверхности емкости необходима накладка из ферромагнитной стали AISI 430, навариваемая поверх основной емкости, изготовленной из пищевой нержавеющей стали AISI 304, применяемой в пищевой промышленности. Использование системы индукторов, повторяющих цилиндрический профиль емкости, позволило создать прототип установки двумя зонами нагрева в зависимости от объема обрабатываемого сырья.

В процессе выполнения работы была разработана силовая плата для сопряжения уровней сигналов в МК, созданы схемы драйвера ключей на полевых транзисторах IGBT. Также разработан алгоритм для управления работой и PID-регулирования процесса пастеризации молока в экспериментальной установке на базе микрокомпьютера Raspberry Pi, позволяющего учитывать параметры технологического процесса и максимально точно их поддерживать в пределах задаваемых величин. Подобраны оптимальные значения коэффициентов PID-регулирования, с помощью которых возможно удерживать заданную температуру пастеризации, способную эффективно нейтрализовать все патогенные бактерии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baboli Z. M., Williams L., Chen G. Design of a Batch Ultrasonic Reactor for Rapid Pasteurization of Juices // Journal of Food Engineering. 2020. Vol. 268. Article no. 109736. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109736>
2. Ультразвуковая обработка жидких сред / Г. Н. Самарин [и др.] // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 5. С. 41–45. EDN: YLSEGX
3. Кузьмичев А. В. Модульная установка инфракрасным, ультрафиолетовым облучением и ультразвуковой обработкой жидкости с активным теплообменником // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 4 (33). С. 290–298. EDN: ARGTLA
4. Infrared Radiation Favorably Influences the Quality Characteristics of Key Lime Juice / A. B. Altemimi [et al.] // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, Issue 6. Article no. 2842. <https://doi.org/10.3390/app11062842>
5. A Novel Continuous Hydrodynamic Cavitation Technology for the Inactivation of Pathogens in Milk / X. Sun [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 71. Article no. 105382. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382>
6. Comparison Between Thermal Pasteurization and High Pressure Processing of Bovine Skim Milk in Relation to Denaturation and Immunogenicity of Native Milk Proteins / D. Bogahawaththa [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2018. Vol. 47. P. 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.016>
7. Tigabe S., Bekele A., Pandey V. Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector // Journal of Engineering. 2022. Vol. 2022. Article no. 6214470. <https://doi.org/10.1155/2022/6214470>
8. Ansari A., Parmar K., Shah M. A Comprehensive Study on Decontamination of Food-Borne Microorganisms by Cold Plasma // Food Chemistry: Molecular Sciences. 2022. Vol. 4. Article no. 2100098. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100098>
9. Pulsed Electric Field: a Potential Alternative Towards a Sustainable Food Processing / R. N. Arshad [et al.] // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 111. P. 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
10. Pegu K., Arya S. S. Non-thermal Processing of Milk: Principles, Mechanisms and Effect on Milk Components // Journal of Agriculture and Food Research. 2023. Vol. 14. Article no. 100730. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100730>
11. Optimal Design of High-Frequency Induction Heating Apparatus for Wafer Cleaning Equipment Using Superheated Steam / S. M. Park [et al.] // Energies. 2020. Vol. 13, Issue 23. Article no. 6196. <https://doi.org/10.3390/en13236196>
12. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges / O. Lucia [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61, Issue 5. P. 2509–2520. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>

13. Current Applications and Challenges of Induced Electric Fields for the Treatment of Foods / L. Zhang [et al.] // *Food Engineering Reviews*. 2022. Vol. 14. P. 491–508. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09314-2>
14. Li L., Mi G., Wang C. A Comparison Between Induction Pre-heating and Induction Post-heating of Laser-induction Hybrid Welding on S690QL Steel // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 43. P. 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.003>
15. Investigation of the Effect of Induction Heating on Asphalt Binder Aging in Steel Fibers Modified Asphalt Concrete / H. Li [et al.] // *Materials*. 2019. Vol. 12, Issue 7. Article no. 1067. <https://doi.org/10.3390/ma12071067>
16. Каунова Л. М. Обоснование конструктивных параметров индукционного нагревателя для пастеризации молока // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 3 (112). С. 141–148. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-141-148>
17. Обоснование параметров конструктивных элементов индукционного нагревателя для пастеризации молока в потоке / С. В. Соловьев [и др.] // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019. № 1 (75). С. 100–103. EDN: YXZMVV
18. Bagaev A, Bobrovskiy O. Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency // *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023. Vol. 53, Issue 2. P. 272–280. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>
19. Başaran A., Yilmaz T., Çivi C. Energy and Exergy Analysis of Induction-Assisted Batch Processing in Food Production: a Case Study-Strawberry Jam Production. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 140. P. 1871–1882. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08931-0>
20. Application of Induced Electric Field for Inner Heating of Kiwifruit Juice And its Analysis / C. He [et al.] // *Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 306, Issue 12. Article no. 110609. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110609>
21. Inactivation of Escherichia Coli O157:H7 in Apple Juice Via Induced Electric Field (IEF) And its Bactericidal Mechanism / S. Wu [et al.] // *Food Microbiology*. 2022. Vol. 102. Article no. 103928. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103928>
22. Pasteurization of Guava Juice Using Induction Pasteurizer and Optimization of Process Parameters / C. Lamo [et al.] // *LWT*. 2019. Vol. 112. Article no. 108253. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108253>
23. Başaran A., Yilmaz T., Çivi C. Application of Inductive Forced Heating as a New Approach to Food Industry Heat Exchangers // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018. Vol. 134. P. 2265–2274. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7250-7>
24. Wang G., Wan Z., Yang X. Induction Heating by Magnetic Microbeads for Pasteurization of Liquid Whole Eggs // *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 284. Article no. 110079. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110079>
25. Comparison of Drinking Milk Production with Conventional and Novel Inductive Heating in Pasteurization in Terms of Energetic, Exergetic, Economic and Environmental Aspects / A. Başaran [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 317, Issue 1. Article no. 128280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128280>
26. Development of an Innovative Induction Heating Technique for the Treatment of Liquid Food: Principle, Experimental Validation and Application / S. Wu [et al.] // *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 271. Article no. 109780. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109780>
27. Induction Heating as Cleaner Alternative Approach in Food Processing Industry / R. A. Razak [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1878. Article no. 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012053>
28. A Flexible Cooking Zone Composed of Partially Overlapped Inductors / J. Serrano [et al.] // *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2018. Vol. 65, Issue 10. P. 7762–7771. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2801815>
29. Jibril M., Tadesse M., Alemayehu E. Temperature Control of Stirred Tank Heater using Optimal Control Technique // *ScienceOpen Preprints*. 2020. <https://doi.org/10.14293/S2199-1006.1.SOR-PPVT203.v1>
30. Optimization of Pid Control Parameters with Genetic Algorithm Plus Fuzzy Logic in Stirred Tank Heater Temperature Control Process / N. I. Septiani [et al.] // 2017 International Conference on



Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS). 2017. P. 61–66. <https://doi.org/10.1109/ICECOS.2017.8167167>

31. Divya Priya A. V., Tamilselvan G. M., Rajesh T. Real Time Implementation of Fuzzy Based PID Controller Tuning for Continuous Stirred Tank Heater (CSTH) Process // Journal of Fuzzy Systems. 2018 Vol. 10, Issue 3. P. 78–81. URL: <https://www.i-scholar.in/index.php/CiiTFS/article/view/172673/0> (дата обращения: 01.07.2023).

32. Alamirew T., Balaji Dr. V., Gabbeye N. Comparison of PID Controller with Model Predictive Controller for Milk Pasteurization Process // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2017. Vol. 6, Issue 1. P. 24–35. <https://doi.org/10.11591/eei.v6i1.575>

33. Hariyadi E., Singgih H. Optimization of Pid Controler In Temperature Control System Processes Pasteurization of Milk // American Journal of Engineering Research (AJER). 2017. Vol. 6, Issue 9. P. 175–187. URL: [https://www.ajer.org/papers/v6\(09\)/V0609175187.pdf](https://www.ajer.org/papers/v6(09)/V0609175187.pdf) (дата обращения: 01.07.2023).

34. Induction Heating in Domestic Cooking and Industrial Melting Applications: A Systematic Review on Modelling, Converter Topologies and Control Schemes / P. Vishnuram [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14, Issue 20. Article no. 6634. <https://doi.org/10.3390/en14206634>

*Поступила в редакцию 04.09.2023; поступила после рецензирования 04.10.2023;
принята к публикации 20.11.2023*

Об авторах:

Неверов Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности Института инженерных технологий Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3542-786X>, ResearcherID: H-3524-2017, neverov42@mail.ru

Владимиров Александр Александрович, кандидат технических наук, проектный менеджер Дома научной коллаборации им. П. А. Чихачева Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8438-2872>, fizickemsu@mail.ru

Коротких Павел Сергеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теплохладотехники Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4546-0276>, korotkix42@gmail.com

Николаева Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, руководитель Дома научной коллаборации им. П. А. Чихачева Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6393-1898>, nevkem@yandex.ru

Порохнов Андрей Николаевич, директор Дома научной коллаборации им. П. А. Чихачева Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6416-4122>, Researcher ID: O-8306-2017, porohnov@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Е. Н. Неверов – научное руководство, постановка цели и задач исследования.

А. А. Владимиров – разработка прототипа и модуля силовой части установки, разработка алгоритма регулирования процессом пастеризации, проведение испытаний работы прототипа и подбор оптимальных коэффициентов PID-регулирования температуры.

П. С. Коротких – литературный и патентный анализ.

Е. В. Николаева – разработка конструктивного решения расположения основных узлов прототипа пастеризации и изготовление прототипа, доработка текста статьи.

А. Н. Порохнов – проведение анализа информационных источников, участие в изготовлении прототипа, обработка экспериментальных данных и их контрафактуальный анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Baboli Z.M., Williams L., Chen G. Design of a Batch Ultrasonic Reactor for Rapid Pasteurization of Juices. *Journal of Food Engineering*. 2020;268:109736. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109736>
2. Samarin G.N., Skoptsova T.I., Eventeva E.A., Krivoguzov D.Yu. Ultrasonic Treatment of a Liquid Medium. *Proceedings of the State Agricultural Academy of Velikie Luki*. 2017;(5):41–45. (In Russ.) EDN: YLSEGX
3. Kuzmichyov A.V. Modular Plant with Infrared, Ultraviolet and Ultrasonic Treatment of Liquid With Active Heat Exchanger. *Innovations in agriculture*. 2019;(4):290–298. (In Russ.) EDN: ARGUTA
4. Altemimi A.B., Al-Hilphy A.R.S., Abdelmaksoud T.G., Aboud S.A., Badwaik L.S., Noore S., et al. Infrared Radiation Favorably Influences the Quality Characteristics of Key Lime Juice. *Applied Sciences*. 2021;11(6):2842. <https://doi.org/10.3390/app11062842>
5. Sun X., Xuan X., Ji L., Chen S., Liu J., Zhao S., et al. A Novel Continuous Hydrodynamic Cavitation Technology for the Inactivation of Pathogens in Milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;71:105382. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382>
6. Bogahawaththa D., Buckow R., Chandrapala J., Vasiljevic T. Comparison Between Thermal Pasteurization and High Pressure Processing of Bovine Skim Milk in Relation to Denaturation and Immunogenicity of Native Milk Proteins. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2018;47:301–308. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.016>
7. Tigabe S., Bekele A., Pandey V. Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector. *Journal of Engineering*. 2022;2022:6214470. <https://doi.org/10.1155/2022/6214470>
8. Ansari A., Parmar K., Shah M. Comprehensive Study on Decontamination of Food-Borne Microorganisms by Cold Plasma. *Food Chemistry: Molecular Sciences*. 2022;4:00098. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100098>
9. Arshad R.N., Abdul-Malek Z., Roobab U., Munir M.A., Naderipour A., Qureshi M., et al. Pulsed Electric Field: a Potential Alternative Towards a Sustainable Food Processing. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;111:43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
10. Pegu K., Arya S.S. Non-Thermal Processing of Milk: Principles, Mechanisms and Effect on Milk Components. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;14:100730. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100730>
11. Park S.M., Jang E., Park J.S., Kim J.-H., Choi J.-H., Lee B.K. Optimal Design of High-Frequency Induction Heating Apparatus for Wafer Cleaning Equipment Using Superheated Steam. *Energies*. 2020;13:6196. <https://doi.org/10.3390/en13236196>
12. Lucia O., Maussion P., Dede E., Burdío J.M. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014;61(5):2509–2520. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>
13. Zhang L., Liu F., Jin Y., Wu S., Xu X., Yang N. Current Applications and Challenges of Induced Electric Fields for the Treatment of Foods. *Food Engineering Reviews*. 2022;14:491–508. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09314-2>
14. Li L., Mi G., Wang C. A Comparison Between Induction Pre-Heating and Induction Post-heating of Laser-Induction Hybrid Welding on S690QL Steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;43:276–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.003>
15. Li H., Yu J., Wu S., Liu Q., Li Y., Wu Y., et al. Investigation of the Effect of Induction Heating on Asphalt Binder Aging in Steel Fibers Modified Asphalt Concrete. *Materials*. 2019;12(7):1067. <https://doi.org/10.3390/ma12071067>
16. Kaunova L.M. Substantiation of the Design Parameters of an Induction Heater for Milk Pasteurization. *AgroEcoEngineeriya*. 2022;(3):141–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-141-148>
17. Soloviev S.V., Morozov V.V., Radkevich E.V., Kartashov L.P., Makarovskaya Z.V. Rationale of Parameters of Constructive Elements of an Induction Heater for Pasteurizing Milk in a Stream. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019;(1):100–103. (In Russ.) EDN: YXZMVV

18. Bagaev A., Bobrovskiy O. Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(2):272–280. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>
19. Başaran A., Yılmaz T., Çivi C. Energy and Exergy Analysis of Induction-Assisted Batch Processing in Food Production: a Case Study-Strawberry Jam Production. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;140:1871–1882. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08931-0>
20. He C., Yang N., Jin Y., Wu S., Pan Y., Xu X., et al. Application of Induced Electric Field for Inner Heating of Kiwifruit Juice and its Analysis. *Journal of Food Engineering*. 2021;306(12):110609. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110609>
21. Wu S., Xu X., Yang N., Jin Y., Jin Z., Xie Z. Inactivation of Escherichia Coli O157:H7 in Apple Juice Via Induced Electric Field (IEF) and its Bactericidal Mechanism. *Food Microbiology*. 2022;102:103928. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103928>
22. Lamo C., Shahi N.C., Singh A., Singh A.K. Pasteurization of Guava Juice Using Induction Pasteurizer and Optimization of Process Parameters. *LWT*. 2019;112:108253. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108253>
23. Başaran A., Yılmaz T., Çivi C. Application of Inductive Forced Heating as a New Approach to Food Industry Heat Exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018;134:2265–2274. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7250-7>
24. Wang G., Wan Z., Yang X. Induction Heating by Magnetic Microbeads for Pasteurization of Liquid Whole Eggs. *Journal of Food Engineering*. 2020;284:110079. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110079>
25. Başaran A., Yılmaz T., Azgın Ş.T., Çivi C. Comparison of Drinking Milk Production with Conventional and Novel Inductive Heating in Pasteurization in Terms of Energetic, Exergetic, Economic and Environmental Aspects. *Journal of Cleaner Production*. 2021;317:128280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128280>
26. Wu S., Yang N., Jin Y., Li D., Xu Y., Xu X., et al. Development of an Innovative Induction Heating Technique for the Treatment of Liquid Food: Principle, Experimental Validation and Application. *Journal of Food Engineering*. 2020;271:109780. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109780>
27. Razak R.A., Ibrahim N.M., Rahman A.S.F., Fayzul M., Azizan M.M., Hashim U., et al. Induction Heating as Cleaner Alternative Approach in Food Processing Industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1878:012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012053>
28. Serrano J., Acero J., Lope I., Carretero C., Burdío J.M. A Flexible Cooking Zone Composed of Partially Overlapped Inductors. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018;65(10): 7762–7771. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2801815>
29. Jibril M., Tadese M., Alemayehu E. Temperature Control of Stirred Tank Heater using Optimal Control Technique. *ScienceOpen Preprints*. 2020. <https://doi.org/10.14293/S2199-1006.1.SOR-PPVT203.v1>
30. Septiani N.I., Bayusari I., Caroline, Haiyunnisa T., Suprpto B.Y. Optimization of Pid Control Parameters with Genetic Algorithm Plus Fuzzy Logic in Stirred Tank Heater Temperature Control Process. *2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*. 2017;61–66. <https://doi.org/10.1109/ICECOS.2017.8167167>
31. Divya Priya A.V., Tamilselvan G.M., Rajesh T. Real Time Implementation of Fuzzy Based PID Controller Tuning for Continuous Stirred Tank Heater (CSTH) Process. *Journal of Fuzzy Systems*. 2018;10(3):78–81. Available at: <https://www.i-scholar.in/index.php/CiiTFS/article/view/172673/0> (accessed 01.07.2023).
32. Alamirew T., Balaji Dr.V., Gabbeye N. Comparison of PID Controller with Model Predictive Controller for Milk Pasteurization Process. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2017;6(1):24–35. <https://doi.org/10.11591/eei.v6i1.575>
33. Hariyadi E., Singgih H. Optimization of Pid Controller in Temperature Control System Processes Pasteurization of Milk. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2017;6(9):175–187. Available at: [https://www.ajer.org/papers/v6\(09\)/V0609175187.pdf](https://www.ajer.org/papers/v6(09)/V0609175187.pdf) (accessed 01.07.2023).

34. Vishnuram P., Ramachandiran G., Sudhakar Babu T., Nastasi B. Induction Heating in Domestic Cooking and Industrial Melting Applications: A Systematic Review on Modelling, Converter Topologies and Control Schemes. *Energies*. 2021;14(20):6634. <https://doi.org/10.3390/en14206634>

Submitted 04.09.2023; revised 04.10.2023; accepted 20.11.2023

About the authors:

Evgeny N. Neverov, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Technosphere Safety at the Institute of Engineering Technologies of Kemerovo State University (6 Krasnaya St., Kemerovo 650000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3542-786X>, ResearcherID: H-3524-2017, neverov42@mail.ru

Alexander A. Vladimirov, Cand.Sci. (Engr.), Project Manager of P.A. Chikhachev HSC, Kemerovo State University (6 Krasnaya St., Kemerovo 650000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8438-2872>, fizickemsu@mail.ru

Pavel S. Korotkih, Cand.Sci. (Engr.), Senior Lecturer at the Department of Heat and Cooling Engineering of Kemerovo State University (6 Krasnaya St., Kemerovo 650000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4546-0276>, korotkix42@gmail.com

Elena V. Nikolaeva, Cand.Sci (Phys.-Math.), Head of P.A. Chikhachev HSC, Kemerovo State University (6 Krasnaya St., Kemerovo 650000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6393-1898>, nevkem@yandex.ru

Andrey N. Porokhnov, Director of P.A. Chikhachev HSC of Kemerovo State University (6 Krasnaya St., Kemerovo 650000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6416-4122>, Researcher ID: O-8306-2017, porokhnov@gmail.com

Authors contribution:

E. N. Neverov – scientific guidance, setting the goals and objectives of the study.

A. A. Vladimirov – developing the prototype and module of the unit power part, developing the algorithm for controlling the pasteurization process, testing of the prototype operation and selecting optimal coefficients of PID temperature control.

P. S. Korotkih – literary and patent analysis.

E. V. Nikolaeva – developing a constructive solution for the location of the main parts of the pasteurization prototype unit, making the prototype unit, and revising the article text.

A. N. Porokhnov – analyzing information sources, participation in making a prototype unit, processing experimental data and their counterfactual analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

УДК 621.373.8:772.96

doi: [10.15507/2658-4123.034.202401.145-163](https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.145-163)

Original article



Using Laser Point Scanning Thermography for Quality Monitoring of Products Made of Composite Materials

A. G. Divin^{a, b}✉, S. V. Karpov^b, Yu. A. Zakharov^{a, b},
N. A. Karpova^b, A. A. Samodurov^a, D. Yu. Golovin^a,
A. I. Tyurin^a

^a Derzhavin Tambov State University
(Tambov, Russian Federation)

^b Tambov State Technical University
(Tambov, Russian Federation)

✉ agdv@yandex.ru

Abstract

Introduction. Control of the presence of subsurface defects in products from composite materials is necessary for verification of products after release from production and in the process of operation.

Aim of the Study. The purpose of the presented work is to estimate the parameters of subsurface defects using local laser thermography, suitable for quality control of both small objects and suspicious areas of large objects with curved surfaces.

Materials and Methods. The laboratory setup on which this work was carried out includes a robotic arm, a COX CG640 thermal imager and a 3 W laser. The method was tested on a fiberglass sample with introduced delamination defect simulations located at different depths below the surface. By means of computer modeling rational parameters of thermographic control were selected, providing reliable detection of the defect at a depth of up to 3 mm under the surface of the composite sample.

Results. Numerical modeling of surface temperature field induced by moving focused laser beam was carried out using COMSOL software package. It showed that laser beam with 3 W power moving at 5 mm/s provided the thermal contrast sufficient to detect the defects at the depth up to 3 mm. The obtained experimental data are in satisfactory agreement with numerical modeling both qualitatively and quantitatively. Experimental data were used to construct a regression model for determining defect depth based on the maximal thermal contrast and the time interval between heating and the contrast maximum.

© Divin A. G., Karpov S. V., Zakharov Yu. A., Karpova N. A., Samodurov A. A., Golovin D. Yu., Tyurin A. I., 2024



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

Discussion and Conclusion. The results obtained in this work allow us to propose a technique for detecting defects in fiberglass plastics and estimating their depth. The coefficient of determination for the obtained regression model was found to be equal to 0.95, and the mean square error of the metric was no more than 0.016 mm². The use of a robotic arm to scan objects will make it possible to investigate objects with complex curved surfaces.

Keywords: laser scanning thermography, non-destructive testing, composite materials, finite element analysis, mathematical modeling

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

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

For citation: Divin A.G., Karpov S.V., Zakharov Yu.A., Karpova N.A., Samodurov A.A., Golovin D.Yu., et al. Using Laser Point Scanning Thermography for Quality Monitoring of Products Made of Composite Materials. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):145–163. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.145-163>

Оригинальная статья

Применение лазерной точечной динамической термографии для контроля качества изделий из композиционных материалов

А. Г. Дивин^{1, 2✉}, С. В. Карпов², Ю. А. Захаров^{1, 2},
Н. А. Карпова², А. А. Самодуров¹, Д. Ю. Головин¹,
А. И. Тюрин¹

¹ Тамбовский государственный университет
имени Г. Р. Державина

(г. Тамбов, Российская Федерация)

² Тамбовский государственный технический университет
(г. Тамбов, Российская Федерация)

✉ agdv@yandex.ru

Аннотация

Введение. Контроль наличия подповерхностных дефектов в изделиях из композиционных материалов необходим при верификации изделий после выпуска из производства и в процессе эксплуатации.

Цель исследования. Решение научной проблемы оценки параметров подповерхностных дефектов по результатам точечной лазерной термографии, пригодной для контроля качества как малогабаритных изделий, так и проблемных участков крупногабаритных объектов с криволинейной поверхностью.

Материалы и методы. Лабораторная установка, на которой проводились исследования, включала в себя робота-манипулятора, тепловизионную камеру COX CG640, источник лазерного воздействия мощностью до 3 Вт. Объектом исследования являлся тестовый образец из стеклоглепестика, содержащий имитации дефекта типа «расслоение», расположенные на различном расстоянии от поверхности. На основании математического моделирования подобраны рациональные режимы проведения термографического контроля, обеспечивающие надежное выявление дефекта в подповерхностном слое (до 3 мм) композиционного материала.

Результаты исследования. В ходе исследования проведены численные расчеты температурного поля поверхности тестового образца с использованием пакета прикладных программ COMSOL после теплового воздействия движущимся лазером.

Результаты расчетов позволили определить рациональную скорость 5 мм/с движения лазера мощностью 3 Вт, обеспечивающую требуемый температурный контраст для дефектов с глубиной залегания до 3 мм. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно совпадают с численным экспериментом как качественно, так и количественно. При этом результаты экспериментов позволили определить регрессионную модель для расчета глубины залегания дефекта по максимальному температурному контрасту и времени достижения этого контраста.

Обсуждение и заключение. Результаты, полученные в ходе исследований, позволили предложить алгоритм обнаружения дефектов в изделиях из стеклоуглепластика, а также глубину их залегания. Коэффициент детерминации для полученной регрессионной модели оказался равным 0,95, а метрика MSE (средняя квадратическая ошибка) составила не более 0,016 мм². Использование робота-манипулятора для сканирования изделия позволит в будущем контролировать изделия со сложной криволинейной поверхностью.

Ключевые слова: лазерная сканирующая термография, неразрушающий контроль, композиционные материалы, конечно-элементный анализ, математическое моделирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Для цитирования: Применение лазерной точечной динамической термографии для контроля качества изделий из композиционных материалов / А. Г. Дивин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 1. С. 145–163. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.145-163>

Introduction

Composite materials are suitable for manufacturing lightweight and durable products, so they can be used in aircraft and automotive industries, and for a renewable energy sector. At the same time, these materials are subject to increased reliability requirements, making the task of detecting internal defects at different stages of manufacturing and operation especially relevant [1]. The defects such as delamination and fiber damage in the material can lead to reduced mechanical properties including strength and stiffness, resulting in a potential risk of structural failure.

To detect internal defects, non-destructive testing (NDT) methods are usually used. In the case of composite materials, the scientific and technical literature provides information about a variety of NDT methods for assessing the quality of materials and detecting defects. Infrared thermography [2], ultrasonic [3] and thermoacoustic tests [4], X-ray inspection [5] are just some of the methods used to inspect products made from composite materials. Each of the above methods has its own advantages and disadvantages and associated areas of application. One of the most common methods is ultrasonic testing, which allows for accurate detection of internal defects, their position and size. The use of phased arrays and machine learning methods have significantly expanded the information content of the method and the accuracy of testing [6; 7]. However, this method has a drawback – there is a blind spot near the surface of the product. In addition, this method is demanding in terms of the quality of the test object surface and the presence of lubricant. Therefore, for such defects as delamination, lack of glue, and the defects located at a depth of 0 to 3 mm, it is advisable to use methods that are free of these disadvantages. Thermographic methods of active testing, which have recently

been developed significantly, can be used as such [8; 9]. These methods are based on a specially organized thermal effect on the product material and subsequent registration of the temperature field of its surface, the distortion of which indicates the presence of internal inhomogeneities in the material. These inhomogeneities can be caused by embedded elements, which are known in advance, and by defects that need to be detected. Halogen and xenon lamps, lasers, a flow of hot air or liquid, and thermoacoustic emission and dissipation of mechanical energy during friction or impact are used as a source of thermal influence [10–12]. Additionally, there are known the methods involving the direct cooling of the tested product surface [13].

The use of incandescent lamps, in particular halogen lamps, which are most widely used in thermographic testing, makes it possible to heat quickly a large area of the test object and detect defects by the presence of anomalies in the non-stationary temperature field. However, in our opinion, the use of such lamps is not always advisable for several reasons. Firstly, the lamps do not provide uniform heating of the test object with a curved surface. Secondly, it is necessary to use various types of screens to protect against glares caused by the reflected infrared light of a hot lamp and its fittings from the surface of an object. In this regard, it makes sense to use local heating of the sample using a laser with the power necessary to achieve a given temperature contrast of the defective zone and a thermal imaging camera with a sensitivity threshold better than the temperature contrast of the defect in the thermal imaging image. The camera can be fixed relative to the test object, or move along with the source being at a certain distance from it [14; 15]. To increase efficiency of testing, you can use several laser radiation sources placed at a fixed distance from each other (from several mm to several cm), or a laser beam deployed in a line [16]. In addition, the use of a robotic manipulator as a tool for moving the laser makes it possible to maintain a given direction of the light flux relative to the normal to the surface and, thus, ensure uniform heating of the sample along the movement trajectory. If there are any structural inhomogeneities in the material, temperature anomalies zones occurring on its surface will be recorded using a thermal imaging camera. To detect the defects, researchers use technical vision systems based on machine learning technologies [17], and classical image processing tools [10].

Laser spot thermography has a higher sensitivity to surface and subsurface defects, but low productivity, so it is advisable to use it for additional inspection of product problem areas detected by other inspection methods, or for inspection of small-sized products. In the article by Rellinger T. and co-authors [18], it was shown that laser thermography in combination with other methods is a more reliable method than all currently known ones.

As the thermography analysis shows, the decisive effect on the effectiveness of testing is exerted by the choice of rational operating parameters when organizing the thermal effect on the test object, and the velocity of the thermal effect point on the surface of the sample. Thus, to measure these parameters, it is necessary to use numerical simulation of the temperature field on the sample surface that makes it possible to select acceptable testing parameters to ensure its effectiveness.

During a thermographic monitoring, it is important not only to find defects, but also to measure their boundaries and occurrence depth. Concerning long-pulse thermal effects

caused by the energy of halogen lamps, there are many studies devoted to determining the monitoring effectiveness and the occurrence depth of defects [19–21]; however, no similar studies has been found for the method of laser point thermography. To solve the problem of measuring defect parameters using the results of laser point thermography, it was necessary to do the following:

- 1) through using mathematical modeling, select rational modes of thermographic testing that ensure accurate detection of a “delamination” type defect in the subsurface layer of the composite material;

- 2) develop an installation and verify the monitoring method using a test sample;

- 3) develop a model to estimate the occurrence depth of defects, an algorithm for testing and data processing.

Literature Review

In the article by Jiao D. and co-authors [16] it is proposed to use a method of laser point thermography [18] for testing surface cracks with a small opening width, for which the linear laser scanning method produces blurred shapes and low temperature contrast. The proposed analytical models of the temperature field on the surface of the test sample show that the temperature gradient at the heating point is influenced by the distance from the crack to the heating point, and the ratio of the sample material thermal conductivity coefficients and the substance filling the crack. The low thermal conductivity of the crack material makes it difficult to transfer heat through it that when scanning with a point heat source, leads to a sharp change in the temperature gradient. Thus, in the temperature distribution along the sample scanning line, where the trajectory of the heating spot intersects the crack, higher temperature fluctuations will be observed. Jiao D. and co-authors in their article [16] propose to restore the shape and location of the entire surface crack in the product after repeated laser scanning of the sample surface in different directions. However, the author did not consider the possibility of using this method to detect subsurface defects.

In the article by Ibarra-Castanedo C. and co-authors [22], there was studied robotic line scan thermography (LST) for testing the aerospace industry products. The method involves line-by-line heating of a part with simultaneous obtaining of a series of thermograms using a thermal imager, which, together with a heating source, moves over a stationary sample. The robotic method enables to inspect large areas of objects under monitoring, following the “relief” of their surface with high accuracy and scanning velocity [14; 15]. The drawback of this method is inability to determine the occurrence depth of the defect, because the thermal imager moves with the heat source and records the areas temperature field concurrently after heating.

When using laser scanning thermography, an urgent task is to increase temperature contrasts. This is necessary to obtain information about the texture of the defect area, highlight the defect boundaries and increase the difference between the defect area and defect-free areas of the material. Contrast enhancement techniques typically involve converting sample surface temperature maps [23] or adjusting temperature distribution histograms [24]. However, when using these methods, noise in thermal images increases resulting in loss of defect information. That is why recently, special algorithms have been developed. For example, in the article by Li Y. and co-authors [25], a method for

increasing the contrast of a thermal image with homomorphic technology was proposed. The essence of this technology is to perform a non-linear transformation of a thermal image with the result that the non-additive factors making up the image become additive to facilitate processing with increasing contrast in the frequency domain.

Some methods are based on preprocessing the data from defect-free areas in the infrared range [26]. The study results have shown that this method effectively reduces the effect of uneven laser energy distribution on the defect detection efficiency and improves the quality of information about internal defects. Moreover, the combination of the proposed preprocessing method with pulsed phase thermography and principal component analysis algorithms improves the ability of laser infrared thermography to detect defects inside aircraft carbon fiber reinforced plastics .

In this regard, we can conclude that in general, scanning thermography is extremely sensitive to the monitoring process parameters. Therefore, the study and justification of optimal modes of active thermal effect on the surface of samples through using numerical modeling for the correct and reliable operation of algorithms for post-processing temperature fields is an urgent task.

Materials and Methods

To select rational modes of the thermographic monitoring process, there were carried out numerical calculations of the temperature field of the virtual test sample surface. The equation of unsteady thermal conductivity (Fourier-Kirchhoff law) for a three-dimensional temperature field [27] was used to simulate the temperature field in the sample using the finite element method. The heat source was described in accordance with the equation¹:

$$-n \cdot q = P_0 \cdot f(O, e) \frac{|e \cdot n|}{\|e\|}, \quad (1)$$

where P_0 is rated laser power, W; $f(O, e)$ is a function that considers the direction and degree of heat release irregularities in the laser beam-heated area; $O = O(x, y, z, \tau)$ are coordinates of central laser focusing point at the current time τ ; e is vector quantity describing the radiation direction in relation to the body surface; n is the normal vector to the sample surface; q is the heat flow vector.

Inside the heating spot, heat release occurs according to the normal distribution law, which corresponds to the equation²:

$$f(O, e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right); \quad (2)$$

$$d = \frac{\|e \cdot (x - O)\|}{\|e\|}, \quad (3)$$

where d is the set of points inside the laser beam at the current time; $\sigma = 2.5$ mm is the laser beam standard deviation with respect to the central laser focusing point coordinate.

¹ Yilbas B.S. Laser Heating Applications: Analytical Modelling. Elsevier; 2012.

² Ibid.

External heat transfer is convective heat transfer on the side walls in accordance with the criterion equations of natural convection on horizontal and vertical walls³, and radiant heat transfer on the side walls of the plate in accordance with the Stefan-Boltzmann equation:

$$-n \cdot q = \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4), \quad (4)$$

where $T_{amb} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ is the ambient temperature.

As a modeling object, we considered a plate made of fiberglass in the shape of a parallelepiped of size $150 \times 40 \times 10$ mm. When modeling, the following material properties were: heat capacity $c = 1\,369\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, density $\rho = 1\,900\text{ kg/m}^3$, thermal conductivity $0,3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. The internal cavity in the form of a parallelepiped of size $10 \times 10 \times 1$ mm, located in the central part of the plate, was considered as a defect (Fig. 1).

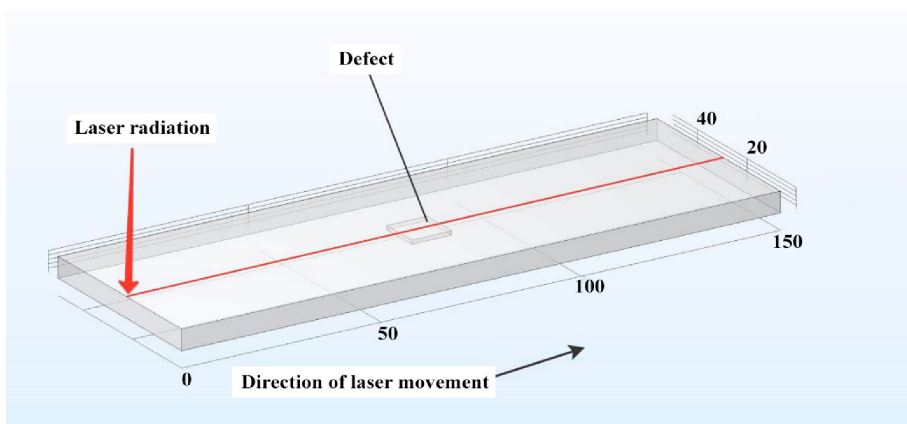


Fig. 1. A model sample, mm

During the simulation, the heating spot moved along the middle line of the top face along the length of the sample long side. The following velocities for the laser beam moving were set: $V_{laser} = 5, 10$ and 15 mm/s and the defect occurrence depth $def_{depth} = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5\text{ mm}$.

As a result of numerical modeling, there were found the data of temperature distributions on the surface of the sample along the laser scanning line. As an example there is given the temperature distribution (Fig. 2) across the red line (Fig.1) of a test sample containing a defect located at a depth of 1 mm. It can be seen that the presence of a defect significantly distorts the temperature field in the vicinity of the central point $x = 75\text{ mm}$. In this case, after the heating spot passes over the defect, the temperature difference (temperature contrast) between the defective and defect-free zones reaches its maximum.

For the velocities of the heating spot movement along the surface of the sample in the range from 5 to 15 mm/s, the values of temperature contrasts were calculated; plotting the dependences shown in Figure 3 reveals that the most acceptable laser velocity can be determined to be 5 mm/s for a laser power of 3 W and a defect depth of 1 mm.

³ Kasatkin A.G. [Basic Processes and Devices of Chemical Technology : Textbook for Universities]. Moscow : Al'yanS; 2009. (In Russ.)

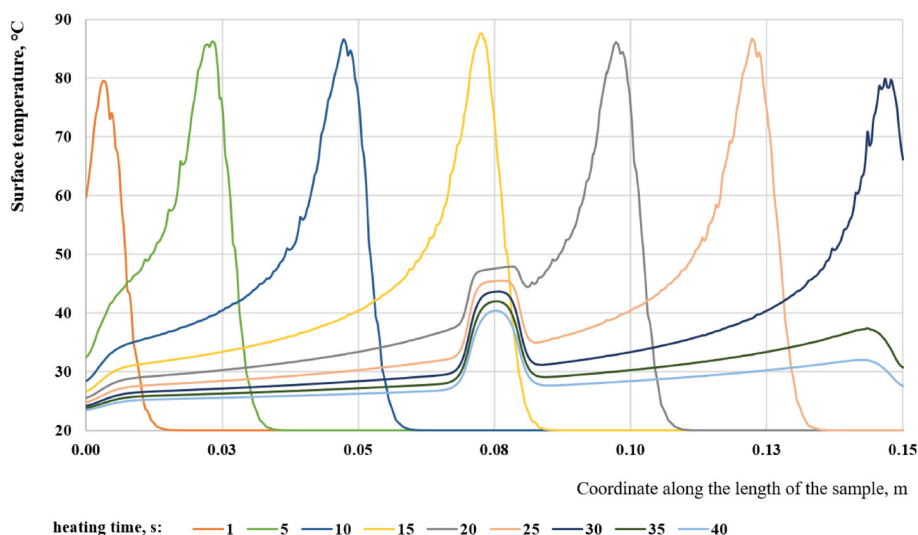


Fig. 2. Temperature of the sample surface along its length at different times (s),
 $def_{depth} = 1 \text{ mm}$, $V_{laser} = 5 \text{ mm/s}$

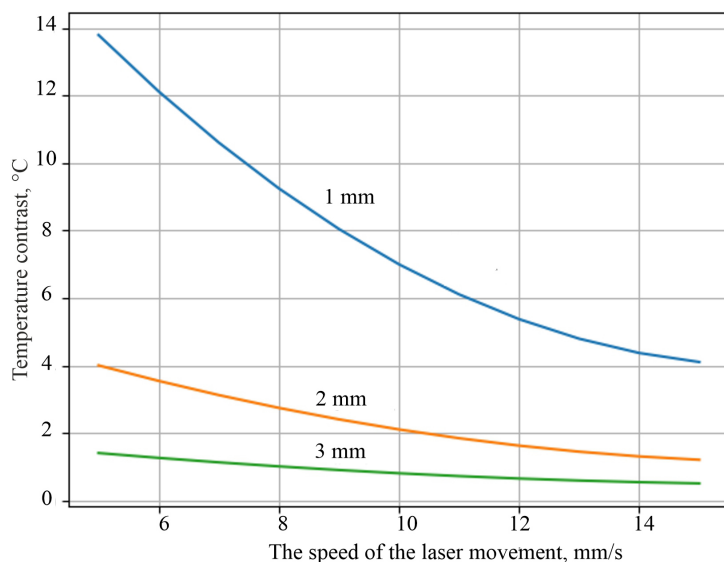


Fig. 3. Temperature contrasts on the defective sample surface at a depth of 1 mm, 2 mm and 3 mm, for different laser velocities

The criteria to select the operating parameters for monitoring are the temperature contrast of the surface above the defect (reliably detected by a thermal imager), and the temperature of the sample material, which should not exceed 100 °C.

Thus, the results of numerical modeling indicate the advisability of choosing a velocity of 5 mm/s, which provides a temperature contrast of at least 4 °C and heating the sample no more than 80 °C.

To check the adequacy of the numerical calculations, there were carried out experimental studies of a control sample made of fiberglass *1* (Fig. 4), which is a plate 200×350 mm and 5 mm thick. This sample had artificially created “delamination” type defects, because in it during the manufacturing process, there were placed titanium plates in a fluoroplastic shell at different depths (between 1 and 3 mm), which were later removed. Two groups A and B were formed, each containing six defects in the form of trapezoids, differing in size.

Group A defects with bases of 15 and 10 mm and a length of 50 mm had a depth of 1.2; 1.1; 2.3; 1.3; 1.0; 2.3 mm (according to Fig. 4 from left to right); and group B defects with bases of 5 and 10 mm and a length of 50 mm had a depth of 1.1; 3.1; 2.2; 1.2; 3.0; 2.1 mm respectively.

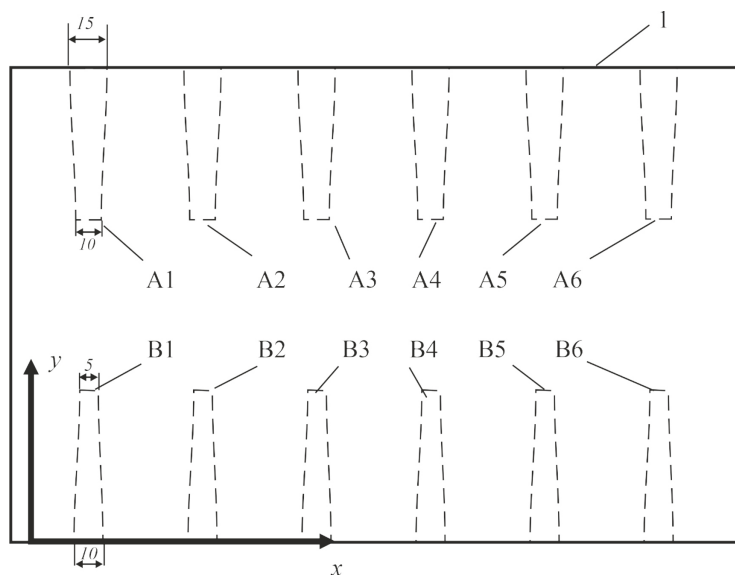


Fig. 4. Test sample sketch

The studies were carried out using a robotic complex consisting of a 5-axis robotic manipulator, the working part of which was a laser with adjustable power up to 3 W and a wavelength of 405 nm.

The basis of the robotic complex is a training and research manipulator with a spherical service area PASKAL DELTA 5X-ARMDUINO (manufactured in Chelyabinsk (Russia)). The Delta 5X robot (Fig. 5) belongs to the class of manipulators equipped with a direct computer testing system of the PCNC (Personal Computer Numerical Control) class. The robot control unit 3 receives data from the computer 5, interprets it and controls the movement of the working body 2 (laser) of the manipulator 1, energized by the power supply 8. The thermal imaging camera 6 COX CG640 is used to obtain information about the temperature field of the control object 7. It has uncooled long-wave bolometric detector with a resolution of 640×480 pixels, temperature sensitivity of no more than 30 mK, lens with a focal length of 20 mm and manual focusing.

The laser power is controlled by a Type 4 Arduino controller via its Pulse Width Modulation (PWM) output.

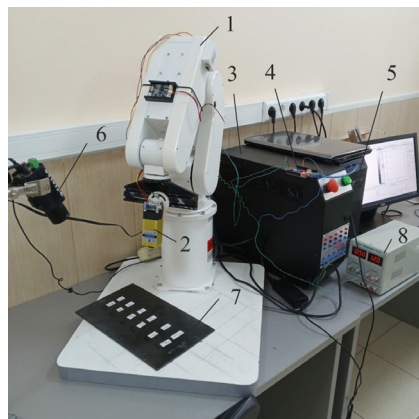


Fig. 5. Experimental setup

The thermal effect point moved from the laser along the sample surface at a given velocity by solving the inverse problem of kinematics and trajectory control.

During testing, the laser beam moved at a velocity of 5 mm/s along the surface of the control sample perpendicular to the long axes of the defective zones, thus scanning a set of defects with different depths. In addition, due to the trapezoidal shape of the defects at different laser passes, the trajectory of the heating point intersected the defects along segments of different lengths.

Based on thermal images recorded by a thermal imaging camera, thermograms were constructed using the developed software. To filter random noise, thermograms were smoothed using the convolve method from the NumPy library of the Python programming language.

Results

Figure 6a shows a typical thermal image frame when scanning the surface of a test object with a subsurface defect. In this case, the product surface (Fig. 6b) is inhomogeneous, which causes anisotropy of thermal properties.

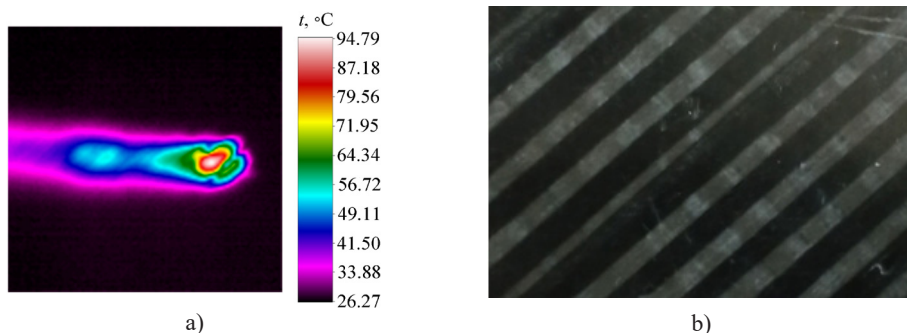


Fig. 6. Temperature trace of a laser heating spot when passing through the product defect zone (a) and a photograph of the product material surface (b)

Based on the data obtained, the dependences of temperature on time and coordinate x in the defective (Fig. 7) and defect-free (Fig. 8) areas were revealed. The visible distortions of the temperature peaks at the moment of the heating spot passage of the sample area are explained by the inhomogeneity of the surface structure and thermal anisotropy of the material, which includes fibers with different emissivity degrees (Fig. 6b).

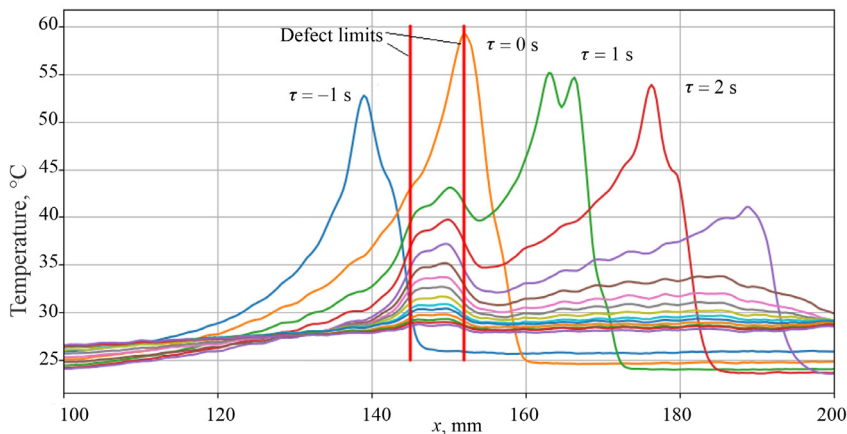


Fig. 7. Thermograms at various times in the vicinity of the defect B4 (Fig. 4)

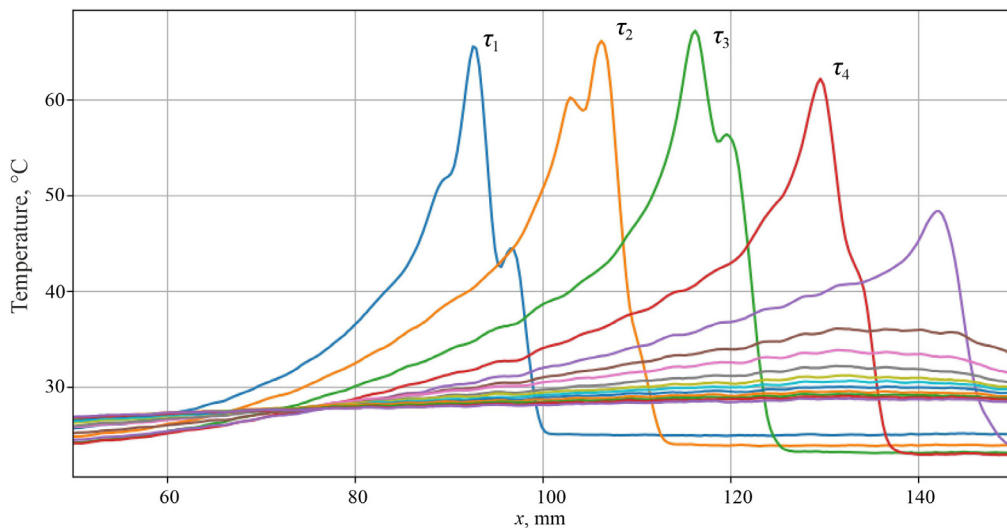


Fig. 8. Thermograms at various points in time in the defect-free area

Of particular interest is the time dependence of the temperature difference in the defective and defect-free areas of the sample after passing through the laser heating spot, since the value of the maximum temperature and the time to reach this temperature are signs of the defect depth [28]. Fig. 9 shows the experimentally obtained dependences of temperature T_2 on time τ for the defective area B4 and temperature T_1 for the defect-free

are. During and after heating, the temperature difference is determined by surface heterogeneity and is uninformative for the model of the dependence of the defect depth

$$\Delta T(\tau) = T_2(\tau - \Delta\tau) - T_1(\tau),$$

where $\Delta\tau$ is an interval between the start of heating at the points at which temperatures T_2 from T_1 are measured. The cooling rate of the material depends on the presence of a defect. The smaller is the depth of the defect, the earlier and more significantly the rate of temperature change decreases, and the greater the temperature contrast (Fig. 9) between the defective and defect-free areas of the sample. To determine the defect depth from thermographic data, one can use analytical solutions obtained by solving a complex inverse problem of thermal conductivity or using the results of numerical calculations [13; 14]. The latter requires significant computing power and time. To estimate the defect occurrence depth, an estimation obtained using multivariate regression analysis is often sufficient. For a model that allows predicting the defect occurrence depth using the empirical data, we formed training samples consisting of the values of variables (predictors) and the values of the quantity being determined (in accordance with Table 1).

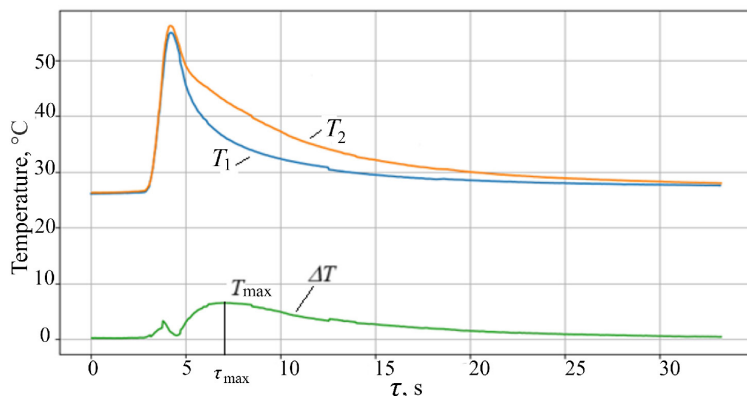


Fig. 9. Dependence of the temperature difference on time in the defective T_2 and defect-free T_1 areas of the sample after passing the laser heating spot of defect B4 (Fig. 4)

Temperature values T_2 and T_1 for constructing thermograms were taken as the average from an area of 20×20 pixels of the thermal image of the heating spot temperature trace (Fig. 6a).

Table 1

Training sample structure

№	Maximum temperature $T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Time to reach maximum temperature, τ_{\max}, s	Depth of defect h , mm	Defect width w , mm
1	6.64	3.9	1.2	7.1
2	5.54	4.2	1.1	6.6
3	0.74	13.7	3.0	7.0
4	0.8	14.0	3.1	7.2
...
30	4.05	5.01	2.2	12.1

As a result of applying the nonlinear multivariate regression algorithm from the “Sklearn.linear_model” library of the Python programming language, a regression model was obtained that has the form:

$$h = -0.24 \cdot T_{\max} + 0.04 \cdot \tau_{\max} + 0.045 \cdot w + 2.31, \quad (5)$$

where h is predicted value of the defect occurrence depth. At the same time, the quality metrics of the regression model were equal: coefficient of determination $R^2 = 0.95$, and the mean square error $MSE = 0.016 \text{ mm}^2$. Model verification on the test sample also showed satisfactory results (Fig. 10).

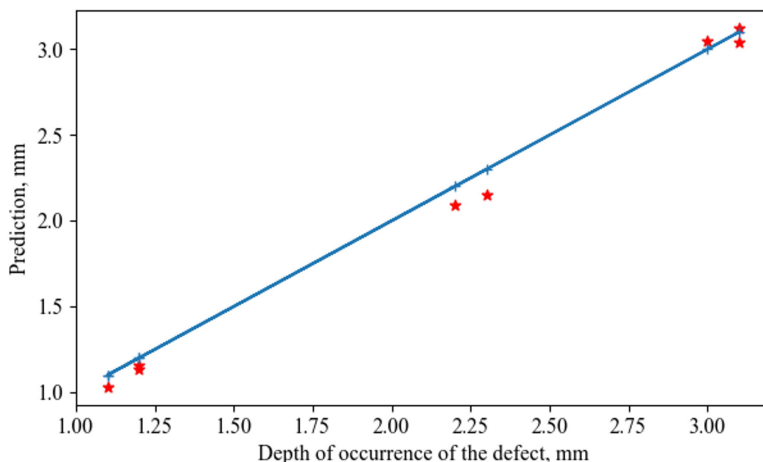


Fig. 10. Scatter diagram for the regression model for determining the defect depth of the (* means predicted values; + means a model)

The results obtained during experimental studies made it possible to propose and implement the following algorithm for detecting and determining the occurrence depth of defects.

1. Determining scan paths for a product made of composite materials to identify defects with different orientations;
2. Calculating control actions on the robot manipulator drives to implement the specified scan paths;
3. Scanning a product with a laser at a constant velocity along specified scan paths;
4. Constructing thermograms for scanning lines filtered from random noise using the “np.convolve” method based on temperatures obtained 10 s after passing the heating spot (Fig. 11). Thermograms for this time value will be informative for subsurface defects of the product located at depths of up to 3 mm.
5. Determining local amplitude values T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) obtained thermograms and finding time values $\tau_{i \max}$ after passing the heating spot, when these amplitudes become maximum and equal $T_{i \max}$. By values $\tau_{i \max}$ and $T_{i \max}$ the defect depths are found using the regression model (2).

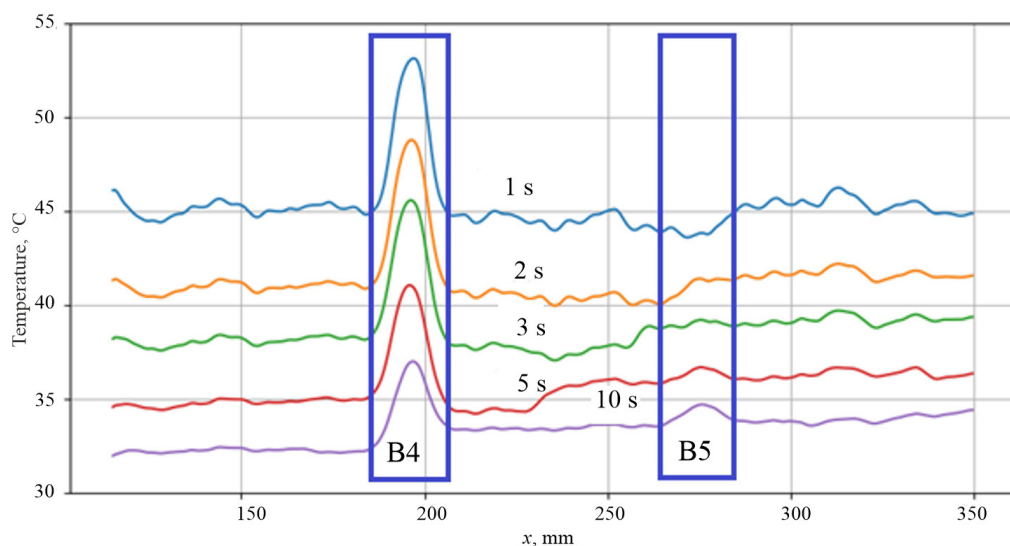


Fig. 11. Thermograms obtained for different times after passing the heating spot

6. The boundaries of defects are determined by local maxima of the first derivative according to the x coordinate for the obtained thermogram (Fig. 12). As experiments have shown, the measuring error in the defect width based on the maximum and minimum of the first derivative does not exceed 5% if the occurrence depth is up to 1 mm, and 10% if the occurrence depth is from 1 to 3 mm.

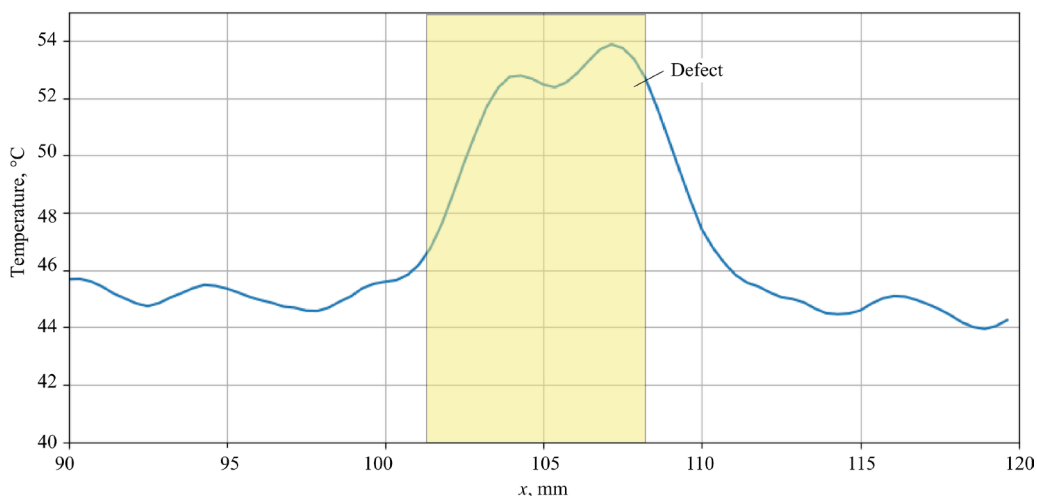


Fig. 12. Thermogram for A4 defect ($y = 25$ mm) after 4 s interval since heating beam passage

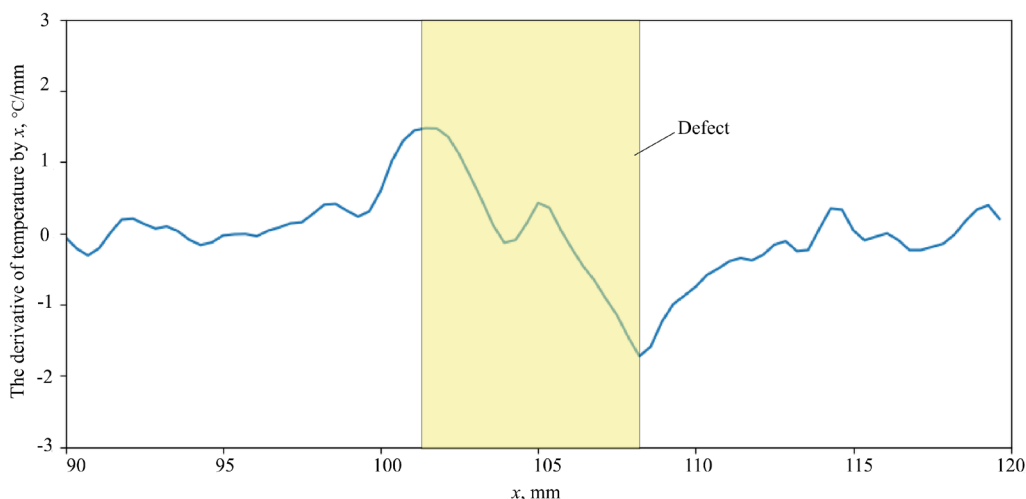


Fig. 13. The first derivative of the distribution $T(x)$ according to the x coordinate to determine the defect boundaries

Discussion and Conclusion

The paper discussed a robotic complex, which implements the method of dynamic scanning thermography using the local thermal effect of a laser on the test object. The experimental studies carried out to identify subsurface defects of the “delamination” type have shown high sensitivity and the ability not only to determine the presence of a defect, but also to determine its boundaries and estimate its occurrence depth. The method is suitable for testing small-sized products, and for more careful monitoring of problem areas of large-sized objects made of composite materials [14]. The experiments have shown that at the initial stage of the thermal process, the surface structure of the product is of great importance that makes it possible to record surface defects, but at the same time, makes it difficult to detect subsurface defects. To detect such defects accurately, it is recommended to cover the surface of the test area with matte black paint.

REFERENCES

1. He Y., Pan M., Chen D., Luo F. PEC Defect Automated Classification in Aircraft Multi-Ply Structures with Interlayer Gaps and Lift-Offs. *NDT & E International*. 2013;53:39–46. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.10.007>
2. Pawlak A.M., Górny T., Dopierała Ł., Paczos P. The Use of CFRP for Structural Reinforcement – Literature Review. *Metals*. 2022;12(9):1470. <https://doi.org/10.3390/met12091470>
3. Mathiassen K., Fjellin J.E., Glette K., Hol P.K., Elle O.J. An Ultrasound Robotic System Using the Commercial Robot UR5. *Front. Robot. AI*. 2016;3:1. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00001>
4. Frhaan W.K.M., Abu Bakar B.H., Hilal N., Al-Hadithi A.I. CFRP for Strengthening and Repairing Reinforced Concrete: A Review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021;6:49. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00417-5>
5. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A review. *Polymers*. 2021;13(21):3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>

6. Siljama O., Koskinen T., Jessen-Juhler O., Virkkunen I. Automated Flaw Detection in Multi-Channel Phased Array Ultrasonic Data Using Machine Learning. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021;40:67. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00796-4>
7. Honarvar F., Varvani-Farahani A. A Review of Ultrasonic Testing Applications in Additive Manufacturing: Defect Evaluation, Material Characterization, and Process Control. *Ultrasonics*. 2020;108:106227. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106227>
8. Golovin D.Yu., Divin A.G., Samodurov A.A., Tyurin A.I., Golovin Yu.I. A New Rapid Method of Determining the Thermal Diffusivity of Materials and Finished Articles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020;93:234–240. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02113-8>
9. Golovin Yu.I., Samodurov A.A., Golovin D.Yu., Tyurin A.I., Divin A.G., Zakharov Yu.A. Measurement of the Thermal Diffusivity of Optical Materials and Products by a New Thermographic Express Method That Does Not Require Cutting Samples Out of the Bulk. *Measurement Techniques*. 2023;66:36–44. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02187-9>
10. Li Y., Yang Z., Zhu J., Ming A., Zhang W., Zhang J. Investigation on the Damage Evolution in the Impacted Composite Material Based on Active Infrared Thermography. *NDT & E International*. 2016;83:114–122. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.06.008>
11. Golovin Yu.I., Golovin D.Yu., Tyurin A.I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021;2021:512–527. <https://doi.org/10.1134/S0036029521040091>
12. Berthe J., Chaibi S., Portemont G., Paulmier P., Laurin F., Bouvet C. High-Velocity Infrared Thermography for In-Situ Damage Monitoring During Impact Test. *Composite Structures*. 2023;314:116934. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116934>
13. Doshvarpassand S., Wang X. Article an Automated Pipeline for Dynamic Detection of Sub-Surface Metal Loss Defects Across Cold Thermography Images. *Sensors*. 2021;21(14):4811. <https://doi.org/10.3390/s21144811>
14. Khodayar F., Lopez F., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Optimization of the Inspection of Large Composite Materials Using Robotized Line Scan Thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017;36:32. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0412-x>
15. Khodayar F., Lopez F., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Parameter Optimization of Robotize Line Scan Thermography for CFRP Composite Inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2018;37:5. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0459-8>
16. Jiao D., Shi W., Liu Z., Xie H. Laser Multi-mode Scanning Thermography Method for Fast Inspection of Micro-cracks in TBCs Surface. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2018;37:30. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0485-1>
17. Bang H.T., Park S., Jeon H. Defect Identification in Composite Materials Via Thermography and Deep Learning Techniques. *Composite Structures*. 2020;246:112405. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112405>
18. Rellinger T., Underhill P.R., Krause T.W., Wowk D. Combining Eddy Current, Thermography and Laser Scanning to Characterize Low-Velocity Impact Damage in Aerospace Composite Sandwich Panels. *NDT & E International*. 2021;120:102421. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102421>
19. Marani R., Campos-Delgado D.U. Depth Classification of Defects in Composite Materials by Long-Pulsed Thermography and Blind Linear Unmixing. *Composites Part B: Engineering*. 2023;248:110359. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110359>
20. Wei Y., Zhang S., Luo Y., Ding L., Zhang D. Accurate Depth Determination of Defects in Composite Materials Using Pulsed Thermography. *Composite Structures*. 2021;267:113846. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113846>
21. Wang Z., Wan L., Zhu J., Ciampa F. Evaluation of Defect Depth in CFRP Composites by Long Pulse Thermography. *NDT & E International*. 2022;129:102658. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102658>
22. Ibarra-Castanedo C., Servais P., Ziadi A., Klein M., Maldague X. RITA – Robotized Inspection by Thermography and Advanced Processing for the Inspection of Aeronautical Components. 2014. <https://doi.org/10.21611/qirt.2014.164>



23. Vandone A., Rizzo P., Vanali M. Image Processing for the Laser Spot Thermography of Composite Materials. In: *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2012. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. San Diego, 2012. Vol. 8347. <https://doi.org/10.1117/12.914713>
24. Archer T., Beauchêne P., Passilly B., Roche J.M. Use of Laser Spot Thermography for the Non-Destructive Imaging of Thermal Fatigue Microcracking of a Coated Ceramic Matrix Composite. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2021;18(3):141–158. <https://doi.org/10.1080/17686733.2019.1705732>
25. Li Y., Song Y.J., Yang Z.W., Xie X.Y. Use of Line Laser Scanning Thermography for the Defect Detection and Evaluation of Composite Material. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2022;29(1). <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0007>
26. Wang Q., Hu Q., Qiu J., Pei C., Li X., Zhou H., et al. Image Enhancement Method for Laser Infrared Thermography Defect Detection in Aviation Composites. *Optical Engineering*. 2019;58(10):103104. <https://doi.org/10.1117/1.oe.58.10.103104>
27. Narasimhan T.N. Fourier's Heat Conduction Equation: History, Influence, and Connections. *Reviews Geophysics*. 1999;37(1):151–172. <https://doi.org/10.1029/1998RG900006>
28. Chulkov A., Vavilov V., Nesteruk D., Burleigh D., Moskovchenko A. A Method and Apparatus for Characterizing Defects in Large Flat Composite Structures by Line Scan Thermography and Neural Network Techniques. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2023;17(63):110–121. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.63.11>
29. Hernandez-Valle S., Peters K. Numerical Simulation of Phase Images and Depth Reconstruction in Pulsed Phase Thermography. *Measurement Science and Technology*. 2015;26(11):115602. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/11/115602>
32. Shen J., Zhang Y. [Calculation of Solid Cylinder Pore Defect Depth in Hot Shaft Forgings by Improved Fireworks Algorithm]. *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*. 2023;34(4). (In Chin.) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-132X.2023.04.002>

Submitted 29.10.2023; revised 02.11.2023; accepted 17.11.2023

Поступила в редакцию 29.10.2023; поступила после рецензирования 02.11.2023;
принята к публикации 17.11.2023

About the authors:

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

Sergey V. Karpov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Computer Integrated Systems in Mechanical Engineering, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8238-1537>, ResearcherID: M-2341-2017, Scopus ID: 56991212400, g7302@yandex.ru

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

Nataliya A. Karpova, Postgraduate Student of the Chair of Mechatronics and Technological Measurements, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya St., Tambov 392000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5893-094X>, natalie.poroshina.tmb@gmail.com

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

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

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

Authors contribution:

A. G. Divin – general idea of the study, development of the concept of hardware, data processing techniques.

S. V. Karpov – numerical modeling of temperature fields.

Yu. A. Zakharov – development of an algorithm and software for recording and processing temperature values obtained using a thermal imaging camera.

N. A. Karpova – assembly of a laboratory installation, conducting experiments.

A. A. Samodurov – development of algorithms for data registration and measurement processing.

D. Yu. Golovin – regression analysis.

A. I. Tyurin – development of measurement methods.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

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

Карпов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерно-интегрированных систем в машиностроении Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8238-1537>, ResearcherID: M-2341-2017, Scopus ID: 56991212400, g7302@yandex.ru

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

Карпова Наталия Александровна, аспирант кафедры мехатроники и технологических измерений Тамбовского государственного технического университета (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5893-094X>, natalie.poroshina.tmb@gmail.com

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



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

Тюрин Александр Иванович, кандидат физико-математических наук, директор НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина (392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8020-2507>, Scopus ID: 57221837737, tyurinalalexander@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

А. Г. Дивин – общая идея исследования, разработка концепции аппаратного обеспечения, методики обработки данных.

С. В. Карпов – численное моделирование температурных полей.

Ю. А. Захаров – разработка программного обеспечения для регистрации температурных изменений при помощи тепловизионной камеры.

Н. А. Карпова – сборка лабораторной установки, проведение экспериментов.

А. А. Самодуров – разработка алгоритмов регистрации данных и обработки измерений.

Д. Ю. Головин – проведение регрессионного анализа.

А. И. Тюрин – разработка методики проведения измерений.

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 resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. 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 18.03.2024 г. Дата выхода в свет 29.03.2024 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 13,65.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 100 экз. Заказ № 159. 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 18.03.2024. Date of publishing 29.03.2024.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 13.65.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 100 copies. Order no. 159. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)