

doi: 10.15507/2658-4123.032.202203

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

**Том 32, № 3. 2022**

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

**16+**



**Vol. 32, no. 3. 2022**

SCIENTIFIC JOURNAL  
Founded in January 1990  
Periodicity:  
Quarterly

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

doi: 10.15507/2658-4123

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

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

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

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

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

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

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

Подписной индекс – **70539**

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

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

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

## Научный журнал «Инженерные технологии и системы»

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки (по состоянию на 20.07.2022 г.):

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

EBSCO

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

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



## The scientific journal Engineering Technologies and Systems

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

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

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

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

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

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

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as at 20 July 2022):

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

EBSCO

The journal is a member of Open Access Scholarly Publishers Association (OASPA),

Directory of Open Access Journals (DOAJ), Committee on Publication

Ethics (COPE), Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef and the international community of reviewers Publons

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



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

**Chen Daifen** – Vice Dean of the School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology; Director of the International Joint Laboratory of Ship Green Power and Emission Control of Jiangsu, Ph.D., Professor, ORCID: 0000-0002-3070-1989 (Zhenjiang, China)

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **АГРОИНЖЕНЕРИЯ**

- Комаров В. А., Курашкин М. И.** Оценка уровня технологической оснащённости предприятий технического сервиса агропромышленного комплекса в Приволжском федеральном округе..... 338
- Ростовцев Р. А., Ковалев М. М., Перов Г. А., Просолов С. В.** Исследование инновационного процесса тербления стеблей в аппаратах с поперечными ручьями..... 355

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

- Лиханов В. А., Лопатин О. П.** Применение рапсового масла и этанола в дизельном двигателе ..... 373
- Ерошенко Ф. В., Лапенко Н. Г., Сторчак И. Г., Бильдиева Е. А., Костицын Р. Д., Старостина М. А.** Оценка природных растительных сообществ с использованием данных дистанционного зондирования Земли в условиях степей Ставропольского края..... 390
- Антипина Е. В., Мустафина С. А., Антипин А. Ф., Морозкин Н. Д.** Алгоритм решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями..... 410

### **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ**

- Чжань Д., Сунь Л., Мао Ц., Лей Ц., Чжень Д., Левцев А. П.** Теплопередача кипящего потока в слое рифленого медного пеноматериала с открытыми порами..... 423
- Тарасов Е. М., Тарасова А. Е.** Автоматизированная система определения координаты поезда с самонастройкой решающей функции ..... 437

### **ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ**

- Беляков М. В., Самарин Г. Н., Кудрявцев А. А., Ефременков И. Ю.** Изменение спектральных фотолуминесцентных свойств молока при скисании ..... 460
- Информация для авторов и читателей (на рус. яз.)*.....476
- Информация для авторов и читателей (на англ. яз.)*.....478

## **CONTENTS**

### ***AGRICULTURAL ENGINEERING***

- Komarov V. A., Kurashkin M. I.** Assessing the Equipment Level of Technical Service Enterprises in the Agricultural Sector of the Volga Federal District..... 338
- Rostovtsev R. A., Kovalev M. M., Perov G. A., Prosolov S. V.** Studying the Innovative Flax Pulling Process in Apparatuses with Transverse Pulling Channels..... 355

### ***TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT***

- Likhanov V. A., Lopatin O. P.** Usage of Rapeseed Oil and Ethanol in a Diesel Engine ..... 373
- Eroshenko F. V., Lopenko N. G., Storchak I. G., Bildieva E. A., Kostitsyn R. D., Starostina M. A.** Assessment of Natural Plant Communities through the Use of Remote Sensing Data of the Stavropol Territory Steppes..... 390
- Antipina E. V., Mustafina S. A., Antipin A. F., Morozkin N. D.** Algorithm for Solving the Problem of Optimal Control of a Chemical-Technological Process with Terminal Constraints.....410

### ***ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT***

- Zhang D., Sun L., Mao J., Lei Q., Chen D., Levitsev A. P.** Flow Boiling Heat Transfer of Grooved Copper Foam with Open Gap..... 423
- Tarasov E. M., Tarasova A. E.** Automated Train Coordinate Determination System with Self-Tuning of the Decision Function ..... 437

### ***FOOD SYSTEMS***

- Belyakov M. V., Samarin G. N., Kudryavtsev A. A., Efremkov I. Yu.** Change of Spectral Photoluminescent Properties of Milk during Souring.....460
- Information for Authors and Readers of the Journal (in Russian)*.....476
- Information for Authors and Readers of the Journal (in English)*.....478

# АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.171(470.4/5)

doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.338-354

Научная статья



## Оценка уровня технологической оснащённости предприятий технического сервиса агропромышленного комплекса в Приволжском федеральном округе

**В. А. Комаров** , **М. И. Курашкин**  
*Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет  
(г. Саранск, Российская Федерация)*

 [komarov.v.a2010@mail.ru](mailto:komarov.v.a2010@mail.ru)

### Аннотация

*Введение.* Уровень технологической оснащённости и качество расстановки оборудования на участках предприятий технического сервиса оказывает значительное влияние на величину площадей производственных участков и эффективность путей перемещения объектов технического сервиса. Цель работы – оценить фактический уровень оснащённости и качество расстановки технологического оборудования на конкретных производственных участках предприятий.

*Материалы и методы.* Качество расстановки оборудования на предприятиях определяется на основании сравнения фактического и нормативного значений коэффициента, учитывающего рабочие места, проезды и проходы на конкретных производственных участках. В процессе исследования предложен метод определения уровня технологической оснащённости участков на основании физического износа технологического оборудования и коэффициента плотности расстановки.

*Результаты исследования.* На 80 % участков не соблюдаются основные нормы технологического проектирования. Фактическое значение коэффициента плотности расстановки оборудования на конкретных участках составляет 1,1–42,8. При этом среднее значение коэффициента составило 12,5 для предприятий с парком менее 25 тракторов, 10,2 для предприятий с парком от 25 до 50 тракторов и 8,6 для предприятий с парком более 50 тракторов. Доля участков с высокой плотностью расстановки оборудования составила 13,3 %, со средней 40,0 % и с низкой 46,7 %. Коэффициенты, наиболее близкие к нормативным значениям, выявлены на участках ремонта гидравлической системы и масляной аппаратуры, полимерном и окраски и сушки. А на таких основных участках, как слесарно-механический, кузнечный, сварочно-наплавочный и др., значения коэффициента плотности расстановки оборудования отличаются от нормативных значений в несколько раз.

*Обсуждение и заключение.* Проведенные исследования показали низкий уровень технологической оснащённости большинства производственных участков предприятий в Приволжском федеральном округе. Результаты исследования позволяют в будущем оптимизировать величины площадей производственных участков и обеспечить эффективность путей перемещения техники внутри корпусов.

© Комаров В. А., Курашкин М. И., 2022



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

**Ключевые слова:** технический сервис, предприятие, производственный участок, технологическая оснащенность, расстановка оборудования

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

**Для цитирования:** Комаров В. А., Курашкин М. И. Оценка уровня технологической оснащенности предприятий технического сервиса агропромышленного комплекса в Приволжском федеральном округе // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 338–354. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.338-354>

Original article

## Assessing the Equipment Level of Technical Service Enterprises in the Agricultural Sector of the Volga Federal District

V. A. Komarov , M. I. Kurashkin  
National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)

 [komarov.v.a2010@mail.ru](mailto:komarov.v.a2010@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The level of technological equipment and quality of equipment placement at the technical service enterprises have a significant impact on the size of work areas and the efficiency of travel paths for moving items of agricultural machinery under repair. The purpose of research is to assess the actual equipment level and the quality of equipment placement at the specific work areas of technical service enterprises.

**Material and Methods.** The quality of the equipment placement at technical service enterprises is determined by comparing the actual and standard values of the coefficient that takes into account the size of work areas and travel paths for moving items of agricultural machinery under repair in particular work areas. There has been proposed a method for determining the level of equipment on the basis of the equipment deterioration and the coefficient of the equipment placement density.

**Results.** Eighty percent of the work areas do not comply with the basic standards of technological design. The actual value of the equipment placement density coefficient at the work areas under research was 1.1–42.8. The average value of the coefficient was 12.5 for enterprises with a fleet of less than 25 tractors, 10.2 for enterprises with a fleet of 25 to 50 tractors and 8.6 for enterprises with a fleet of more than 50 tractors. The share of the work areas with high density of equipment placement was 13.3%, with average density 40.0% and with low density 46.7%. The coefficients closest to the standard values were found in the work areas for repairing the hydraulic systems and oil equipment, restoring machinery parts with polymer composites, and for painting and drying. The values of the coefficient of equipment placement density at such basic work areas as for bench-working and assembling, forging works, welding, fusing, and etc. in some times differ from the standard values.

**Discussion and Conclusion.** The conducted research showed that most of work areas of technical service enterprises in the Volga Federal District have a low level of equipment. The results of the study will allow optimizing the size of the work areas and ensuring the efficiency of travel paths for moving items of agricultural machinery under repair within the buildings.

**Keywords:** technical service, enterprise, work area, equipment, equipment placement

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

**For citation:** Komarov V.A., Kurashkin M.I. Assessing the Equipment Level of Technical Service Enterprises in the Agricultural Sector of the Volga Federal District. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):338–354. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.338-354>

## Введение

В настоящее время одной из важнейших задач технического сервиса является оказание услуг высокого качества при минимальной себестоимости. Так как планировка производственного корпуса и схема расстановки оборудования влияют на выполнение технологических процессов, а следовательно и качество услуг, то необходимо оптимальное размещение на производственной площади участка или корпуса [1–3].

Уровень технической вооруженности предприятия определяет пути формирования планировочных решений. При разработке компоновки предприятия особенно важно учитывать строительные нормы, правила пожарной безопасности и др.<sup>1</sup> Эффективность планировки зависит от методов проведения технологических процессов; количества производственных участков; оборудования; токсичности и взрывопожароопасности производственных процессов.

На основании решения проблемы по расстановке оборудования можно определить оптимальные производственные маршруты, обеспечивающие равномерность загрузки оборудования, и рациональную схему грузопотоков, исключая оборотные и перекрещивающиеся транспортные потоки между участками. Определяющим фактором

рационального размещения оборудования для повышения технологической оснащенности предприятий является коэффициент плотности расстановки оборудования  $K_n$ , учитывающий рабочие места, проезды, проходы и другие строительные нормы расстановки.

Цель исследования – определить фактический уровень оснащенности и качества расстановки технологического оборудования на конкретных производственных участках предприятия.

## Обзор литературы

Разработка компоновок корпусов предприятий основывается на следующих факторах: рациональная последовательность технологических операций; сокращение путей перемещения машин и узлов; эффективная организация производственного процесса и доступ к оборудованию<sup>2</sup> [4; 5]. Планировки корпусов состоят из планов участков с основным производственным и вспомогательным назначением<sup>3</sup>. Они необходимы для качественного функционирования производственного процесса, расстановки оборудования, лабораторий контроля, складов и т. д. Планировочные решения должны обеспечивать оптимальные расстояния между оборудованием на всех участках. При этом расчетная площадь участков должна соответствовать рациональному размещению оборудования [6–8].

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56639-2015. Технологическое проектирование промышленных предприятий. М. : Стандартинформ, 2019 ; СП 56.13330.2011. Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085105> (дата обращения: 02.11.2021) ; ПОТ Р О-14000-001-98. Правила по охране труда на предприятиях и в организациях машиностроения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034035> (дата обращения: 02.11.2021).

<sup>2</sup> ОНТП 02-86. Общесоюзные нормы технологического проектирования авторемонтных предприятий [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/6/6674/index.htm> (дата обращения: 02.11.2021).

<sup>3</sup> ОНТП 16-86. Общесоюзные нормы технологического проектирования термических участков, цехов, производств предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293758/4293758877.htm> (дата обращения: 02.11.2021) ; ОНТП 14-93. Нормы технологического проектирования предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки. Механообрабатывающие и сборочные цехи [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293846/4293846736.htm> (дата обращения: 02.11.2021).

Создание планировочных решений по рабочим местам и технологическому оборудованию на передовых предприятиях производится на основе систем Open Cascade и CAD, состоящих из проектировочных модулей зданий, размеров и геометрических фигур [9–11]. Разработанные при этом компоновки производственных корпусов основаны на построении различных вариантов оптимальных схем грузопотоков или на координатах расположения технологического оборудования [12; 13].

В зависимости от масштабов производства используют два различных способа расстановки оборудования<sup>4</sup>. При крупносерийном и массовом производстве оборудование располагается по ходу технологического процесса. Перемещение техники осуществляется по прямолинейной, Г- и П-образной схемам, если длина производственной линии превышает длину участка [2; 4; 5]. При этом оборудование устанавливается в виде производственной линии, учитывая санитарно-технические нормы. Схема расстановки оборудования определяется последовательностью технологических операций. Данный способ расстановки оборудования позволяет минимизировать площади производственных участков. Схема грузопотоков для участков и рабочих мест при этом не рассматривается [14–16].

Для условий единичного и серийного производства (предприятия технического сервиса) оборудование располагается групповым методом по видам оборудования<sup>5</sup> [3; 14]. Рассматриваемый способ расстановки оборудования позволяет оптимизировать схему грузопотоков для каждого производственного участка и корпуса в целом.

Минимизация площадей участков в данном случае осуществляется, во-первых, путем расстановки оборудования в несколько рядов, во-вторых, с использованием различных видов расстановки по отношению к проходам и проездам<sup>6</sup> [9; 12].

На предприятиях от 10 до 60 % производственных затрат на создание конечного продукта связано с качеством организации материального потока [17; 18]. При этом за критерий оценки выбора оптимального компоновочного плана расстановки оборудования может быть принят минимум мощности материального потока или схемы грузопотоков. Оптимальная схема размещения оборудования на производственных участках позволяет сократить число используемых транспортных средств, простой оборудования и энергетические затраты, а также улучшить управление производственным процессом.

Площади участков для основного и вспомогательного производства определяются различными способами. Наиболее распространенными являются следующие: 1) по удельным площадям, приходящимся на одну единицу оборудования (производственного рабочего, рабочее место, приведенный капитальный ремонт и т. п.)<sup>7</sup>; 2) по фактической площади пола, занимаемой оборудованием, инвентарем и техникой, с учетом проездов, проходов и других строительных норм расстояний<sup>8</sup>. На основании существующих исследований наиболее точным является второй способ определения площадей участков предприятий [7; 15; 19].

Вторым способом площадь участка рассчитывается по суммарной площади  $F_{об}$ , занимаемой оборудованием,

<sup>4</sup> Там же.

<sup>5</sup> Там же.

<sup>6</sup> ГОСТ Р 56639-2015.

<sup>7</sup> Там же ; ОНТП 16-86 ; ОНТП 14-93.

<sup>8</sup> СП 56.13330.2011 ; ПОТ Р О-14000-001-98 ; ОНТП 02-86.

машино-местами и инвентарем на участке, и нормированной величине  $K_n$  (табл. 1) по формуле  $F = F_{об} \cdot K_n$ .

Расстановка оборудования на участках и рабочих местах должна обеспечивать осуществление технологических процессов с использованием оптимальных рабочих приемов и производственных режимов.

Оборудование на участках располагается в соответствии с разработанными схемами грузопотоков в корпусе

и нормами технологического проектирования<sup>9</sup>. Так расстояние от оборудования до стен и колонн корпуса определяется в зависимости от его габаритных размеров. При этом нормы расстояний между единицами оборудования устанавливаются с учетом конкретных производственных условий с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности при осуществлении технологических операций и обслуживании оборудования<sup>10</sup>.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Коэффициент  $K_n$  для расчета площадей основных подразделений предприятий технического сервиса<sup>11</sup>**  
**Coefficient  $K_n$  for calculating the size of main work areas of service enterprises**

| Наименование производственного подразделения / Work area for   | Нормируемый диапазон изменения коэффициента $K_n$ / Normalized range of changes in coefficient $K_n$ |
|--|--|
| Наружной очистки / External cleaning   | 3,0–3,5  |
| Разборочно-сборочное, моечное и дефектовочное / Disassembling and assembling, washing and inspecting for defects   | 3,5–4,5  |
| Ремонта узлов и систем двигателей / Repairing engine components and systems  | 3,5–4,0  |
| Обкатки и испытания двигателей / Breaking in and testing engines   | 4,5–6,0  |
| Слесарно-механическое / Fitting and mechanical work  | 4,0–5,0  |
| Кузнечное / Forging  | 5,5–6,5  |
| Медницкое / Copper works   | 3,5–4,0  |
| Сварочно-наплавочное / Welding and fusing  | 5,5–6,5  |
| Вулканизационное / Vulcanizing   | 4,0–5,0  |
| Ремонта электрооборудования / Repairing electrical equipment   | 3,5–4,0  |
| Ремонта топливной аппаратуры / Repairing fuel equipment  | 3,5–4,0  |
| Ремонта и регулировки сельскохозяйственных машин и оборудования животноводческих ферм / Repairing and adjustment of agricultural machinery and equipment for livestock farms | 5,0–6,0  |
| Ремонта гидравлической системы и масляной аппаратуры / Repairing hydraulic system and oil system apparatuses   | 3,5–4,0  |
| Окраски и сушки / Painting and drying  | 3,5–4,5  |
| Полимерное / Restoring machinery parts with polymer composites   | 3,5–4,5  |
| Инструментально-раздаточная кладовая / Toolshed  | 4,0–4,5  |

<sup>9</sup> ОНТП 02-86 ; ОНТП 16-86 ; ОНТП 14-93.

<sup>10</sup> ГОСТ Р 56639-2015 ; СП 56.13330.2011 ; ПОТ Р О-14000-001-98.

<sup>11</sup> ОНТП 02-86.

При обслуживании оборудования подъемно-транспортными механизмами его расстановка (расстояние от строительных элементов) определяется с учетом исключения «мертвых» зон. При установке оборудования на индивидуальном фундаменте нормы расстояний оборудования от строительных элементов стен принимаются с учетом формы и размеров фундаментов соседнего оборудования<sup>12</sup>.

### Материалы и методы

Площадь предприятий делится на основную и вспомогательную. Основная площадь отводится под производственные участки и включает площадь для размещения рабочих мест, технологического оборудования, приспособлений, подъемно-транспортных механизмов, техники, агрегатов и узлов машин, рабочих мест, проходов и проездов. Площадь вспомогательная отводится под подразделения инженерно-технические, санитарные, бытовые, складские и др.

Нормы расстояний между единицами оборудования и от оборудования до различных видов строительных конструкций и элементов корпусов, расстояние между рядами, а также ширину проходов, цеховых и магистральных проездов с наличием механизированного верхнего и напольного транспорта принимают с учетом общероссийских норм технологического проектирования<sup>13</sup>.

В специальной литературе основные площади производственных участков определяются четырьмя способами<sup>14</sup> [15]. Способ, основанный на определении площади пола, занимаемой технологическим оборудованием, техникой, узлами и агрегатами машин, является наиболее точным и наименее трудоемким. Он, кроме того, учитывает затраты площади на рабочие места,

проходы, проезды и различные строительные нормы расстояний на каждом производственном участке (применяется коэффициент плотности расстановки оборудования  $K_n$ ). Отсюда площадь участков  $F_{\text{уч}}$  определим по формулам:

а) для участков, на которых машины занимают отдельные площади:

$$F_{\text{уч}_n} = \left( \sum_{i=1}^m F_{M_i} \cdot N_i + \sum_{j=1}^l F_{\text{Об}_j} \cdot N_j \right) \cdot K_n; \quad (1)$$

б) для участков, на которых объекты технического сервиса размещены на оборудовании (при этом их габаритные размеры не превышают габаритных размеров станков и стенов):

$$F_{\text{уч}_n} = \left( \sum_{j=1}^l F_{\text{Об}_j} \cdot N_j \right) \cdot K_n, \quad (2)$$

где  $F_{M_i}$  – площадь пола, занятая  $i$ -й техникой на производственном участке, м<sup>2</sup>;  $N_i$  – число  $i$ -й техники, размещенной на производственном участке, ед.;  $F_{\text{Об}_j}$  – площадь пола, занятая  $j$ -м технологическим оборудованием, м<sup>2</sup>;  $N_j$  – число  $j$ -го технологического оборудования, размещенного на производственном участке, ед.;  $K_n$  – коэффициент плотности расстановки оборудования для  $n$ -го производственного участка (табл. 1).

С целью определения окончательной площади участка учитывается только техника, располагающаяся на отдельных площадях в модернизируемом подразделении. При этом учитываются крайние положения перемещающихся узлов оборудования, а также наиболее крупногабаритная техника и ее агрегаты<sup>15</sup> [20].

Для оценки уровня технической вооруженности предприятий необходимо

<sup>12</sup> СП 56.13330.2011 ; ОНТП 02-86 ; ОНТП 14-93.

<sup>13</sup> ГОСТ Р 56639-2015 ; ОНТП 02-86 ; ОНТП 14-93.

<sup>14</sup> ОНТП 02-86.

<sup>15</sup> ОНТП 16-86.

определить плотность расстановки оборудования на отдельных участках и в корпусе в целом. В процессе исследований выявлено, что для решения поставленной задачи достаточно достоверным в данном случае может быть определение фактических значений коэффициента  $K_n$ , учитывающего рабочие места, проезды и проходы [7; 21–23]. При уменьшении значения коэффициента  $K_n$  плотность расстановки оборудования увеличивается, а следовательно, растет уровень технической вооруженности. Преобразуя формулы (1) и (2), получим выражения (3) и (4) для определения фактических значений коэффициента  $K_n$ :

$$K_n = \frac{F_{yч_n}}{\sum_{i=1}^m F_{M_i} \cdot N_i + \sum_{j=1}^l F_{Об_j} \cdot N_j}; \quad (3)$$

$$K_n = \frac{F_{yч_n}}{\sum_{j=1}^l F_{Об_j} \cdot N_j}. \quad (4)$$

### Результаты исследования

На данном этапе исследований проанализированы основные участки ремонтно-обслуживающих баз (РОБ) в АПК Приволжского федерального округа аграрных холдингов,

сельскохозяйственных производственных кооперативов и фермерских хозяйств, у которых вспомогательной производственной деятельностью является категория «Услуги по монтажу, ремонту и техобслуживанию машин для сельского хозяйства» [24–28].

Внешний вид участков, в наибольшей степени отвечающих положениям и правилам нормативно-технической документации, описан в ряде работ [2; 24; 25]. Общая характеристика рассматриваемых РОБ представлена в таблице 2. Как видно из таблицы 2, общая площадь РОБ и площадь основного корпуса растут с увеличением общего парка тракторов. Причем у одной и той же категории предприятия она отличается более чем в 2 раза, а у небольших РОБ, с количеством обслуживаемых тракторов менее 25 ед., общая площадь РОБ отличается более чем в 10 раз.

Интервал изменения фактических значений  $K_n$ , учитывающего рабочие места, проезды и проходы для предприятий АПК, представлен в таблице 3.

Данные исследований показали, что диапазон изменения фактического значения коэффициента  $K_n$  практически не зависит от масштаба предприятия. Однако его значения отличаются почти в 40 раз и имеют значения как намного ниже нормативных значений коэффициента  $K_n$ , так и значительно их превышающие.

Таблица 2

Table 2

**Общая характеристика исследуемых предприятий технического сервиса**  
**General characteristics of the studied technical service enterprises**

| Предприятия технического сервиса с парком тракторов в хозяйствах, шт. / Technical service enterprises with a fleet of tractors in farms, pcs | Количество обследованных хозяйств, шт. / Number of surveyed farms, pcs | Общая площадь предприятий технического сервиса, м <sup>2</sup> / Total area of technical service enterprises, m <sup>2</sup> | Площадь основного производственного корпуса, м <sup>2</sup> / The area of the main production building, m <sup>2</sup> |
|--|--|--|--|
| менее 25 / less than 25  | 69   | 9 970–117 126  | 288–648  |
| от 25 до 50 / from 25 to 50  | 27   | 105 147–222 274  | 432–1 008  |
| от 50 до 75 / from 50 to 75  | 11   | 213 538–361 350  | 864–2 160  |

**Показатели коэффициента  $K_n$  в зависимости от парка тракторов в хозяйствах**  
 **$K_n$  coefficient indicators depending on the fleet of tractors in farms**

| Предприятия технического сервиса с парком тракторов в хозяйствах, шт. / Technical service enterprises with a fleet of tractors in farms, pcs | Фактическое значение коэффициента $K_n$ для расчета площадей основных подразделений / The actual value of the coefficient $K_n$ for calculating the areas of the main divisions |                  |                        |
|--|---|------------------|------------------------|
|  | минимальное / minimal   | среднее / middle | максимальное / maximum |
| менее 25 / less than 25  | 1,1   | 12,5             | 42,8                   |
| от 25 до 50 / from 25 to 50  | 1,6   | 10,2             | 41,7                   |
| от 50 до 75 / from 50 to 75  | 2,1   | 8,6              | 40,0                   |

Это свидетельствует, с одной стороны, о плотности расстановки оборудования выше нормативной на части предприятий, а с другой стороны, о низкой технологической оснащенности и неэффективном использовании производственных площадей РОБ на ряде предприятий. Фактические значения коэффициента  $K_n$ , учитывающего рабочие места, проезды и проходы для различных участков рассматриваемых предприятий, представлены в таблице 4 и на рисунках 1–3.

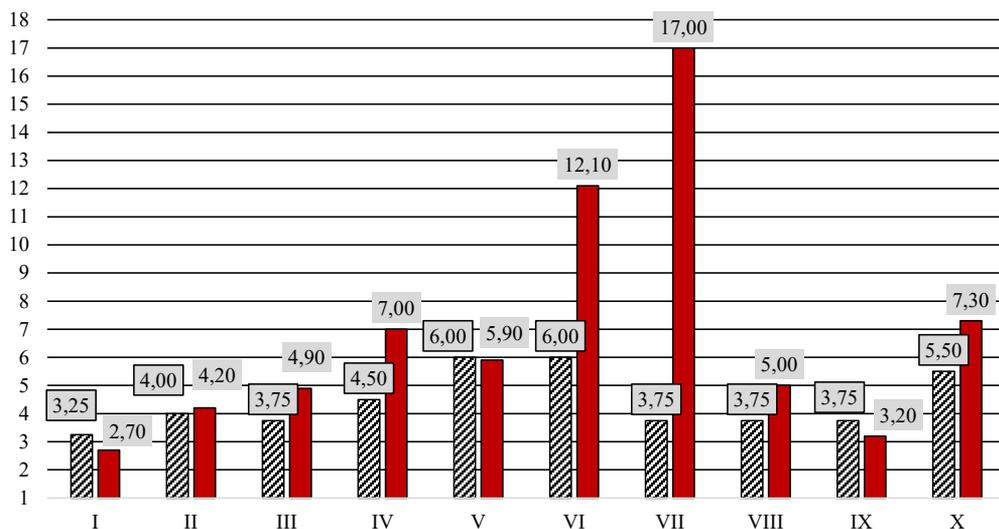
Как видно из таблицы 4 и рисунка 3, фактические значения коэффициента  $K_n$  у большинства участков имеют большой интервал изменения (от 2,5 до 36 раз). Это свидетельствует, с одной стороны, о плотности расстановки оборудования выше нормативной на части участков предприятий, а с другой – о низкой технологической оснащенности и неэффективном использовании производственных площадей участков на ряде предприятий. Внешний вид производственных участков показан на рисунках 4 и 5.

**Показатели коэффициента  $K_n$  для участков предприятий технического сервиса**  
 **$K_n$  ratios for work areas of technical service enterprises**

| Наименование подразделения / Work area for   | Фактическое значение коэффициента $K_n$ / Actual value of the coefficient $K_n$ |                  |                        |
|--|---|------------------|------------------------|
|  | минимальное / minimal   | среднее / middle | максимальное / maximum |
| 1  | 2   | 3                | 4                      |
| Наружной очистки / External cleaning   | 1,1   | 2,7              | 14,5                   |
| Разборочно-сборочное, моечное и дефектовочное / Disassembling and assembling, washing and inspecting for defects | 1,4   | 4,2              | 12,7                   |
| Ремонта узлов и систем двигателей / Repairing engine components and systems                                      | 2,6   | 4,9              | 9,8                    |
| Обкатки и испытания двигателей / Breaking and testing engines  | 3,2   | 5,2              | 7,4                    |
| Слесарно-механическое / Fitting and mechanical work  | 1,5   | 7,0              | 23,3                   |
| Кузнечное / Forging  | 1,7   | 5,9              | 26,0                   |

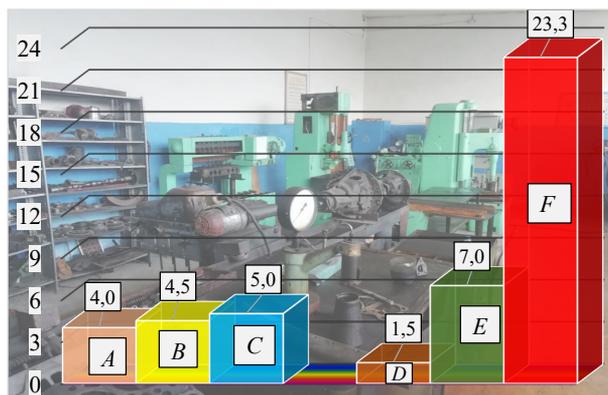
Окончание таблицы 4 / End of table 4

| 1   | 2   | 3    | 4    |
|---|-----|------|------|
| Медницкое / Copper works  | 6,7 | 9,5  | 13,5 |
| Сварочно-наплавочное /<br>Welding and fusing  | 1,2 | 12,1 | 42,8 |
| Вулканизационное / Vulcanizing  | 2,9 | 11,2 | 37,9 |
| Ремонта топливной аппаратуры / Repairing fuel<br>equipment  | 6,0 | 17,0 | 40,0 |
| Ремонта электрооборудования / Repairing<br>electrical equipment   | 1,3 | 5,0  | 13,9 |
| Ремонта гидравлической системы и масляной<br>аппаратуры / Repairing hydraulic system and oil<br>system apparatuses                          | 2,3 | 3,2  | 4,1  |
| Ремонта и регулировки сельскохозяйственных<br>машин и оборудования / Repairing and<br>adjustment of agricultural machinery and<br>equipment | 1,3 | 7,3  | 15,4 |
| Окраски и сушки / Painting and drying   | 3,1 | 3,9  | 5,2  |
| Полимерное / Restoring machinery parts with<br>polymer composites   | 2,8 | 3,8  | 4,9  |
| Инструментально-раздаточная кладовая /<br>Toolshed  | 1,6 | 4,6  | 5,8  |



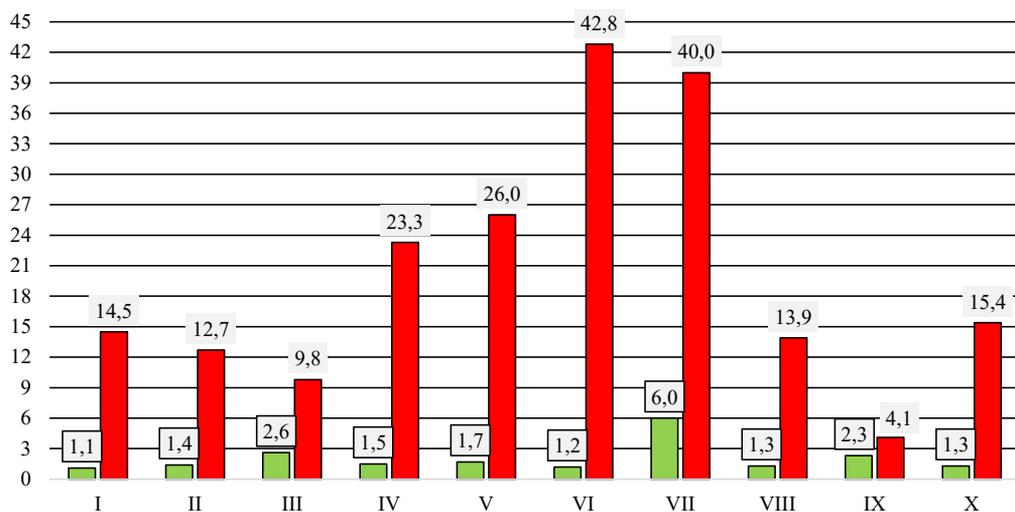
Р и с. 1. Средние нормативные (▨) и фактические (■) значения коэффициента  $K_n$  подразделений:  
 I – наружной очистки; II – разборочно-сборочное, моечное и дефектовочное;  
 III – ремонта узлов и систем двигателей; IV – слесарно-механическое; V – кузнечное;  
 VI – сварочно-наплавочное; VII – ремонта топливной аппаратуры;  
 VIII – ремонта электрооборудования; IX – ремонта гидравлической системы и масляной аппаратуры;  
 X – ремонта и регулировки сельскохозяйственных машин и оборудования

Fig. 1. Average standards (▨) and actual (■) values of  $K_n$  coefficient for work areas:  
 I – external cleaning; II – disassembling and assembling, washing and inspecting for defects;  
 III – repairing engine components and systems; IV – fitting and mechanical work; V – forging;  
 VI – welding and fusing; VII – repairing fuel equipment; VIII – repairing electrical equipment;  
 IX – repairing hydraulic system and oil system apparatuses; X – repairing and adjustment of agricultural  
 machinery and equipment



Р и с. 2. Показатели значения коэффициента  $K_n$  на слесарно-механическом участке:  
 A – нормативное минимальное значение коэффициента  $K_n$ ; B – нормативное среднее значение коэффициента  $K_n$ ; C – нормативное максимальное значение коэффициента  $K_n$ ;  
 D – фактическое минимальное значение коэффициента  $K_n$ ; E – фактическое среднее значение коэффициента  $K_n$ ; F – фактическое максимальное значение коэффициента  $K_n$

F i g. 2. The values of  $K_n$  coefficient at the tool and bench work area: A – normative minimum value of  $K_n$  coefficient; B – normative average value of  $K_n$  coefficient; C – normative maximum value of  $K_n$  coefficient; D – actual minimum value of  $K_n$  coefficient; E – actual average value of  $K_n$  coefficient; F – actual maximum value of  $K_n$  coefficient



Р и с. 3. Минимальные (■) и максимальные (■) фактические значения коэффициента  $K_n$  для различных участков предприятий технического сервиса:

- I – наружной очистки; II – разборочно-сборочное, моечное и дефектовочное;  
 III – ремонта узлов и систем двигателей; IV – слесарно-механическое; V – кузнечное;  
 VI – сварочно-наплавочное; VII – ремонта топливной аппаратуры;  
 VIII – ремонта электрооборудования; IX – ремонта гидравлической системы и масляной аппаратуры; X – ремонта и регулировки сельскохозяйственных машин и оборудования

F i g. 3. Minimum (■) and maximum (■) actual values of  $K_n$  coefficient for various work areas of technical service enterprises: I – external cleaning; II – disassembling and assembling, washing and inspecting for defects; III – repairing engine components and systems; IV – fitting and mechanical work; V – forging; VI – welding and fusing; VII – repairing fuel equipment; VIII – repairing electrical equipment; IX – repairing hydraulic system and oil system apparatuses; X – repairing and adjustment of agricultural machinery and equipment



a)



b)

Р и с. 4. Внешний вид современных производственных участков:  
 а) наружной очистки и мойки ЗАО «Мордовский Бекон»;  
 б) ремонта гидравлических систем птицефабрики «Чамзинская»

F i g. 4. Appearance of modern work areas for: a) external cleaning and washing (ZAO Mordovsky Bekon); b) repairing hydraulic systems (egg and pullet factory Chamzinskaya)



a)



b)

Р и с. 5. Внешний вид производственных участков с устаревшим оборудованием:  
 а) слесарно-механического ЗАО «Мордовский Бекон»;  
 б) сварочно-наплавочного ЗАО «Мордовский Бекон»

F i g. 5. Appearance of work areas with outdated equipment for:  
 a) fitting and mechanical work (ZAO Mordovsky Bekon); b) welding and fusing (ZAO Mordovsky Bekon)

На основании сравнения нормативного и фактического значений коэффициента  $K_n$  для рассматриваемых предприятий проведено разграничение участков по характеру плотности расстановки оборудования. Они показывают, что около половины (46,7 %) производственных участков имеют низкую плотность расстановки оборудования (ниже нормативного значения). Примерно 40,0 % имеют плотность расстановки оборудования в пределах нормативных

значений. И у 13,3 % производственных участков плотность расстановки оборудования выше нормативных показателей.

Исследование конкретных предприятий технического сервиса показало наличие как современных производственных участков (рис. 4), так и использование в большинстве из них морально и физически устаревшего технологического оборудования (рис. 5) и низкий уровень оснащенности

*Агроинженерия*



3. Куцелап К. А. Методика определения оптимального способа размещения оборудования на производственной площадке с целью минимизации транспортных издержек // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2019. № 3. С. 27–33. URL: [http://oreluniver.ru/public/file/archive/Annotatsiya\\_ZHurnal\\_3.pdf](http://oreluniver.ru/public/file/archive/Annotatsiya_ZHurnal_3.pdf) (дата обращения: 29.11.2021).

4. Забудский Г. Г., Амзин И. В. Алгоритм компактного размещения технологического оборудования на параллельных линиях // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2013. Т. 16, № 3. С. 86–94. URL: [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=sjim&paperid=794&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=sjim&paperid=794&option_lang=rus) (дата обращения: 29.11.2021).

5. Соколова Я. В. Методика размещения оборудования на производственных участках машиностроительных производств методом «муравьиных колоний» // *Технология машиностроения*. 2013. № 4. С. 65–68. URL: [http://www.ic-tm.ru/info/4\\_20](http://www.ic-tm.ru/info/4_20) (дата обращения: 29.11.2021).

6. Thurer M., Silva C., Stevenson M. Workload Control Release Mechanisms: from Practice Back to Theory Building // *International Journal of Production Research*. 2010. Vol. 48, Issue 12. P. 3593–3617. doi: <https://doi.org/10.1080/00207540902922810>

7. Achuth Kumar N. V., Asadi S. S. Assesment on Factors Declining Labour Productivity in Construction Projects // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8, Issue 1. P. 340–348.

8. Mohamed A. N. Knowledge Based Approach for Productivity Adjusted Construction Schedule // *Expert Systems with Applications*. 2001. Vol. 21, Issue 2. P. 87–97. doi: [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(01\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(01)00029-X)

9. Вороненко В. П., Соколова Я. В. Алгоритм проектирования технологических планировок предметно-замкнутых участков механообрабатывающих цехов серийного производства // *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*. 2012. № 1. С. 11–14. URL: <http://stankin-journal.ru/ru/articles/493> (дата обращения: 29.11.2021).

10. Чигиринский Ю. Л. Возможность математического решения задачи проектирования планировок производственных помещений // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2008. Вып. 4, № 9. С. 50–53. URL: <http://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/7/2008-09.pdf> (дата обращения: 29.11.2021).

11. Юров А. Н. Проектирование автоматизированной системы производственных планировок // *Моделирование систем и процессов*. 2019. Т. 12, № 1. С. 87–93. doi: [https://doi.org/10.12737/article\\_5d639c813abc99.89415758](https://doi.org/10.12737/article_5d639c813abc99.89415758)

12. Тимофеева Е. В., Тимофеев М. В., Лебедев В. С. Автоматизация размещения оборудования на участке серийного производства с использованием эвристических методов // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева*. 2014. № 3. С. 115–120.

13. Балалаев А. Н., Паренюк М. А. Оценка эффективности размещения оборудования на предприятиях вагонного хозяйства // *Наука и образование транспорту*. 2016. № 1. С. 17–20.

14. Аносова А. И., Бураев М. К. К выбору показателей технологического уровня предприятий технического сервиса машин в АПК // *Вестник ИрГЦХА*. 2014. № 63. С. 85–91. URL: <http://vestnik.irsau.ru/files/v63.pdf> (дата обращения: 08.10.2021).

15. Rokni S., Fayek A. R. A Multi-Criteria Optimization Framework for Industrial Shop Scheduling Using Fuzzy Set Theory // *Integrated Computer-Aided Engineering*. 2010. Vol. 17, Issue 3. P. 175–196. doi: <https://doi.org/10.3233/ICA-2010-0344>

16. Khadiev K., Makarychev K., Belov V. On Analysis of Input Data for Jobs Shop Scheduling Problem with Respect to Workers Productivity // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8, Issue 3. P. 15133–15137. URL: <http://www.ijptonline.com/wp-content/uploads/2016/10/15133-15137.pdf> (дата обращения: 29.11.2021).

17. Горский С. С. Повышение эффективности транспортных систем путем оптимизации материальных потоков на производственных участках механосборочного производства // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2009. № 2. С. 195–201. URL: [https://old.mospolytech.ru/pages/files/sc\\_journal\\_2\(8\)\\_2009.pdf](https://old.mospolytech.ru/pages/files/sc_journal_2(8)_2009.pdf) (дата обращения: 31.03.2021).

18. Методика разработки системы средств технологического оснащения для сервисных предприятий / И. Н. Кравченко [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 4. С. 39–43. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-39-43>

19. Вороненко В. П., Куцелап К. А., Седых М. И. Синтез оптимального планировочного решения для производственных участков многономенклатурного производства при использовании альтернативных технологических процессов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2020. № 4. С. 23–27. URL: <http://stankin-journal.ru/ru/articles/2326> (дата обращения: 15.03.2021).

20. Ломакин Д. О. Комплексный подход к оценке технической и технологической оснащённости автосервисных предприятий // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 4-1. С. 194–197. URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/7556/view> (дата обращения: 08.10.2021).

21. Иванов В. П., Вигерина Т. В. Повышение качества проектов ремонтно-обслуживающих предприятий с использованием композиционных центров // Технический сервис машин. 2021. № 1. С. 115–123. doi: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-1-115-123>

22. Иванов В. П. Композиционные центры в компоновках производственных корпусов автотранспортных предприятий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2021. № 3. С. 28–32. URL: <https://journals.psu.by/index.php/industry/article/view/868/770> (дата обращения: 25.03.2022).

23. Иванов В. П., Вигерина Т. В., Веремей Г. А. Новые планировочные решения производственных участков автотранспортных предприятий // Технический сервис машин. 2022. № 1. С. 11–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48111259> (дата обращения: 25.03.2022).

24. Комаров В. А. Исследование предприятий технического сервиса для обеспечения показателей надёжности машин (на примере агропромышленного комплекса Республики Мордовия) // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 222–238. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.222-238>

25. Комаров В. А., Салмин В. В., Курашкин М. И. Исследование генеральных планов предприятий технического сервиса в агропромышленном комплексе // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 560–577. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.560-577>

26. Комаров В. А., Нуязин Е. А., Курашкин М. И. Исследование процесса постановки на хранение комбайновой и самоходной техники в региональном агропромышленном комплексе // Техника и оборудование для села. 2019. № 5. С. 32–36. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-5-32-36>

27. Комаров В. А., Нуязин Е. А., Курашкин М. И. Хранение сложной сельскохозяйственной техники в Мордовии // Сельский механизатор. 2019. № 9. С. 38–40. URL: <http://selmech.msk.ru/919.html> (дата обращения: 29.11.2021).

28. Комаров В. А., Курашкин М. И. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 2. С. 188–206. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>

*Поступила 04.04.2022; одобрена после рецензирования 21.05.2022; принята к публикации 10.06.2022*

*Об авторах:*

**Комаров Владимир Александрович**, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, Researcher ID: G-8673-2018, komarov.v.a2010@mail.ru

**Курашкин Михаил Иванович**, аспирант кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081>, Researcher ID: B-1295-2019, mishakurashkin@gmail.com.

*Заявленный вклад авторов:*

В. А. Комаров – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, подготовка начального варианта статьи.

М. И. Курашкин – проведение мониторинга ремонтно-обслуживающих баз, обработка результатов исследований, компьютерные работы и визуализация.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Bondarenko V.N., Zhukov Ye.M. [Modeling of the Layout and Technological Solution of a Flexible Production System in Order to Optimize the Arrangement of the Main Technological Equipment]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2006;11(4):594–596. Available at: <http://journals.tsutmb.ru/a8/upload/2019-01/Бондаренко,%20Жуков.pdf> (accessed 31.03.2021). (In Russ.)

2. Voronenko V.P., Kutselap K.A., Shaldov A.E. Equipment Allocation on Production Site Using Flexible Models of Technological Production Routes for Manufacturing Parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2018;(8):11–15. (In Russ., abstract in Eng.) doi: [https://doi.org/10.30987/article\\_5b536400cf58b7.82336964](https://doi.org/10.30987/article_5b536400cf58b7.82336964)

3. Kutselap K.A. Technique of Definition of the Optimum Way of Placement of the Equipment on the Production Site for the Purpose of Minimization of Transport Expenses. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2019;(3):27–33. Available at: [http://oreluniver.ru/public/file/archive/Annotatsiya\\_ZHurnal\\_3.pdf](http://oreluniver.ru/public/file/archive/Annotatsiya_ZHurnal_3.pdf) (accessed 29.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

4. Zabudskiy G.G., Amzin I.V. Algorithms of Compact Location for Technological Equipment on Parallel Lines. *Sibirskiy zhurnal industrialnoy matematiki*. 2013;16(3):86–94. Available at: [http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=sjim&paperid=794&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=sjim&paperid=794&option_lang=rus) (accessed 29.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

5. Sokolova Ya.V. Methods of Equipment Placement at Manufacturing Divisions of Machine-Building Production by the Method of Ant Colonies. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2013;(4):65–68. Available at: [http://www.ic-tm.ru/info/4\\_20](http://www.ic-tm.ru/info/4_20) (accessed 29.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

6. Thurer M., Silva C., Stevenson M. Workload Control Release Mechanisms: from Practice Back to Theory Building. *International Journal of Production Research*. 2010;48(12):3593–3617. doi: <https://doi.org/10.1080/00207540902922810>

7. Achuth Kumar N.V., Asadi S.S. Assesement on Factors Declining Labour Productivity in Construction Projects. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017;8(1):340–348.

8. Mohamed A.N. Knowledge Based Approach for Productivity Adjusted Construction Schedule. *Expert Systems with Applications*. 2001;21(2):87–97. doi: [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(01\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(01)00029-X)

9. Voronenko V.P., Sokolova Y.V. Algorithm for Design Layout in Object-Locked Areas in Machining Workshops with Serial Production. *Vestnik MSTU "STANKIN"*. 2012;(1):11–14. Available at: <http://stankin-journal.ru/ru/articles/493> (accessed 29.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

10. Chigirinskiy Yu.L. [Ability to Mathematically Solve the Problem of Designing the Layout of Production Facilities]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008;4(9):50–53. Available at: <http://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/7/2008-09.pdf> (accessed 29.11.2021). (In Russ.)

11. Yurov A.N. Designing an Automated System Production Planning. *Modeling of Systems and Processes*. 2019;12(1):87–93. doi: [https://doi.org/10.12737/article\\_5d639c813abc9.89415758](https://doi.org/10.12737/article_5d639c813abc9.89415758)

12. Timofeeva Ye.V., Timofeev M.V., Lebedev V.S. [Automation of Equipment Placement on the Batch Production Area Using Heuristic Methods]. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnicheskoy akademii im. P. A. Soloveva*. 2014;(3):115–120. (In Russ.)
13. Balalaev A.N., Parenjuk M.A. [Evaluating the Efficiency of Equipment Placement at Wagon Facilities]. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2016;(1):17–20. (In Russ.)
14. Anosova A.I., Buraev M.K. Choice of Technological Level Indicators of Technical Support Service Enterprise in Agroindustrial Complex. *Vestnik IrGSCHA*. 2014;(63):85–91. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v63.pdf> (accessed 08.10.2021). (In Russ.)
15. Rokni S., Fayek A.R. A Multi-Criteria Optimization Framework for Industrial Shop Scheduling Using Fuzzy Set Theory. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 2010;17(3):175–196. doi: <https://doi.org/10.3233/ICA-2010-0344>
16. Khadiev K., Makarychev K., Belov V. On Analysis of Input Data for Jobs Shop Scheduling Problem with Respect to Workers Productivity. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016;8(3):15133–15137. Available at: <http://www.ijptonline.com/wp-content/uploads/2016/10/15133-15137.pdf> (accessed 29.11.2021).
17. Gorskiy S.S. Effectiveness Increase of Retrieval System by Optimization of Material Flows at the Production Area of Mechanical Assembly Production. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2009;(2):195–201. Available at: [https://old.mospolytech.ru/pages/files/sc\\_journal\\_2\(8\)\\_2009.pdf](https://old.mospolytech.ru/pages/files/sc_journal_2(8)_2009.pdf) (accessed 31.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Kravchenko I.N., Korneev V.M., Kolomeichenko V., et al. Method for Developing a System of Process Equipment for Maintenance Enterprises. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(4):39–43. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-39-43>
19. Voronenko V.P., Kutselap K.A., Sedyh M.I. Synthesis of Optimal Planning Solution for Production Areas of Multi-Item Production Using Alternative Technological Processes. *Vestnik MSTU "STANKIN"*. 2020;(4):23–27. Available at: <http://stankin-journal.ru/ru/articles/2326> (accessed 31.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Lomakin D.O. An Integrated Approach to the Assessment of Technical and Technological Equipment of Workshop. *Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice*. 2015;3(4-1):194–197. Available at: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/7556/view> (accessed 08.10.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Ivanov V.P., Vigerina T.V. Improving the Quality of Projects of Repair Companies Using Composition Centers. *Machinery Technical Service*. 2021;(1):115–123. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-1-115-123>
22. Ivanov V.P. Composition Centers in Production Cases Layout Motor Transportation Companies. *Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences*. 2021;(3):28–32. Available at: <https://journals.psu.by/index.php/industry/article/view/868/770> (accessed 25.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Ivanov V.P., Vigerina T.V., Veremey G.A. New Planning Solutions for Production Sites of Vehicle Enterprises. *Machinery Technical Service*. 2022;(1):11–22. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48111259> (accessed 25.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Komarov V.A. Research of Technical Service Enterprises for Promoting Equipment Reliability (Case Study of Agro-Industrial Complex of the Republic of Mordovia). *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(2):222–238. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.222-238>
25. Komarov V.A., Salmin V.V., Kurashkin M.I. Study of Master Plans of Technical Service Enterprises in Agricultural Sector. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(4):560–577. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.560-577>
26. Komarov V.A., Nuyanzin E.A., Kurashkin M.I. Study of the Process of Putting into Storage of Combine and Self-Propelled Machinery in the Regional Agribusiness. *Machinery and Equipment*

for Rural Area. 2019;(5):32–36. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-5-32-36>

27. Komarov V.A., Nuyanzin Ye.A., Kurashkin M.I. Storage of Complex Agricultural Machinery in Mordovia. *Selskiy Mechanizator*. 2019;(9):38–40. Available at: <http://selmech.msk.ru/919.html> (accessed 29.11.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

28. Komarov V.A., Kurashkin M.I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(2):188–206. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>

*Submitted 04.04.2022; approved after reviewing 21.05.2022; accepted for publication 10.06.2022*

*About the authors:*

**Vladimir A. Komarov**, Professor of the Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1910-2923>, Researcher ID: G-8673-2018, komarov.v.a2010@mail.ru

**Mikhail I. Kurashkin**, Postgraduate Student of the Chair of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081>, Researcher ID: B-1295-2019, mishakurashkin@gmail.com

*Contribution of the authors:*

V. A. Komarov – scientific guidance, formulating the main directions of research, developing theoretical background, and preparing the article original version.

M. I. Kurashkin – monitoring technical service enterprises, processing research results, computing and visualizing.

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



## Исследование инновационного процесса теребления стеблей в аппаратах с поперечными ручьями

Р. А. Ростовцев, М. М. Ковалев , Г. А. Перов, С. В. Просолов  
Федеральный научный центр лубяных культур  
(г. Тверь, Российская Федерация)

 [m.kovalev@fnclk.ru](mailto:m.kovalev@fnclk.ru)

### Аннотация

**Введение.** При уборке льна-долгунца рабочие органы активно взаимодействуют с растениями. Для льнотеребильного аппарата с поперечными ленточно-дисковыми ручьями характерно разделение технологических потоков растений, приводящее к потерям семян и повреждениям стеблей. Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование изменений конструкции теребильного аппарата с поперечными ленточно-дисковыми ручьями за счет исключения разделения технологических потоков растений при их тереблении.

**Материалы и методы.** Экспериментальные исследования по обоснованию параметров и режимов работы теребильного аппарата проводили по имеющимся и разработанным методикам, а оценку льнопродукции – по действующим ГОСТам. Определялось влияние фаз спелости и урожайности льна, а также типа теребильного аппарата на показатели разделения технологических потоков растений и потерь семян. Устанавливали влияние типа теребильного аппарата, ширины захвата теребильной секции и скорости агрегата на показатели переработки льнотреста.

**Результаты исследования.** Получена зависимость для определения комлевой растянутости стеблей с учетом сцепления семенными коробочками. Конструкцию модернизированного теребильного аппарата использовали для того, чтобы оценить, как уменьшение растянутости и устранение разделения технологических потоков растений при тереблении влияет на снижение потерь семян и повышение выхода длинного волокна. В усовершенствованной машине элементы рамы расположены за теребильным аппаратом. Благодаря модернизации теребильного аппарата льнотреста имела более высокие показатели качества: 1,5 номера у ТЛН-1,9М и 1,25 номера у ТЛН-1,9П.

**Обсуждение и заключение.** Модернизированный теребильный аппарат ТЛН-1,9М при уборке посевов в фазе ранней желтой спелости, по сравнению с аппаратом ТЛН-1,9П, позволяет снизить потери семян на 1,4–2,0 %, на 1,3 % возрастает выработка длинного волокна и увеличивается на 0,45 его номер.

**Ключевые слова:** лен-долгунец, растения, стебли, теребильный ручей, комлевая растянутость, коробочки, семена, треста, длинное волокно

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

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

© Ростовцев Р. А., Ковалев М. М., Перов Г. А., Просолов С. В., 2022



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

*Для цитирования:* Исследование инновационного процесса теребления стеблей в аппаратах с поперечными ручьями / Р. А. Ростовцев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 355–372. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.355-372>

Original article

## Studying the Innovative Flax Pulling Process in Apparatuses with Transverse Pulling Channels

R. A. Rostovtsev, M. M. Kovalev✉, G. A. Perov, S. V. Prosolov  
*Federal Scientific Center for Bast Crops  
(Tver, Russian Federation)*

✉ [m.kovalev@fncl.ru](mailto:m.kovalev@fncl.ru)

### Abstract

**Introduction.** During fiber-flax harvesting, the working tools of pulling units actively interact with the flax plants. The flax pulling unit with transverse tape-disc pulling channels is characterized by the separation of technological plant flows resulting in the loss of seeds and damage to the flax stems. The aim of the work is the theoretical and experimental substantiation of changes in the design of the pulling units with transverse tape-disc pulling channels by eliminating the separation of technological plant flows during flax pulling.

**Materials and Methods.** Experimental studies to substantiate the parameters and modes of the pulling unit operation were carried out according to available and newly developed methodologies, while the evaluation of flax products was carried out according to current GOSTs (Russian National standards). There was determined the influence of the flax ripeness stages, flax yield, and a type of pulling unit on the indicators of separation of technological plant flows and on seed losses. The influence of the pulling unit type, operating width of the pulling section, and the pulling unit speed on the indicators of processing flax straw was also established.

**Results.** There was obtained the dependence for determining the flax stem base elongation, taking into account the seed boll cohesion. The design of the modernized flax pulling unit was used to assess the effect of reducing the flax stem base elongation and eliminating the separation of technological plant flows during pulling on the reduction of seed loss and increase in the yield of flax longs. In the improved flax harvester, the frame elements are positioned behind the pulling unit. Thanks to the modernization of the pulling unit, the flax straw was of higher quality: 1.5 numbers at THLN-1.9M and 1.25 numbers at THLN-1.9P.

**Discussion and Conclusion.** The modernized pulling unit THLN-1.9M during flax harvesting in the stage of early yellow ripeness, compared with the unit THLN-1.9P, can reduce seed loss by 1.4–2.0%, increased output of long fiber by 1.3%. The production of flax longs increases to 0.45 of its number.

**Keywords:** long-fiber flax, plants, stems, pulling channel, stem extension, bolls, seeds, flax straw, long fiber

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

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

**For citation:** Rostovtsev R.A., Kovalev M.M., Perov G.A., Prosolov S.V. Studying the Innovative Flax Pulling Process in Apparatuses with Transverse Pulling Channels. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):355–372. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.355-372>

## Введение

Потребность развития льняной отрасли АПК России обуславливается необходимостью производства сырья для текстильных предприятий. Основные задачи льняной отрасли – поставки качественного длинного волокна и производство семенного материала. Выполнение этих задач возможно за счет увеличения сборов льнопродукции и путем повышения ее качества [1–3]. Механизмы и рабочие органы льноуборочных машин при выполнении технологических процессов активно взаимодействуют с растениями льна-долгунца (далее льна) [4–6]. При этом растения льна видоизменяются: растягиваются, сжимаются, скручиваются и др. [7; 8]. Это может негативно сказаться на сборах льнопродукции и качестве длинного волокна и семян [9]. Для уборки льна применяют пять типов технологий: сноповая, комбайновая, раздельная, комбинированная и дифференцированная. Они направлены на производство высококачественной волокнистой продукции или получение посевных семян.

Основная технологическая операция – теробление льна. Механизированное теробление льна на больших площадях обеспечивает получение семенной и волокнистой доли урожая в ограниченные сроки. Следовательно, улучшение рабочих органов необходимо для сохранения всего урожая на любом этапе уборки [10; 11]. Теробление льна оказывает влияние на качественные и количественные параметры урожая [12; 13]. Однако особенности конструкции рабочих органов, которые используются для теробления в российских и зарубежных льнотеробилках и льнокомбайнах, могут

оказывать механическое влияние на стебли, что заметно ухудшает как количественные, так и качественные показатели [4; 5].

Цель работы – теоретическое и экспериментальное обоснование изменений конструкции теробильного аппарата с поперечными ленточно-дисковыми ручьями за счет исключения разделения технологических потоков растений при их тероблении.

## Обзор литературы

Теробление – технологическая операция по извлечению созревших растений из земли вместе с корнями при уборке сельхозкультур<sup>1</sup>. Применяется в технологиях производства лубяных культур, в селекционно-садоводческом процессе и др. В льноводстве для теробления растений используются многочисленные методы и разнообразные устройства. Достоинства и недостатки каждого из известных теробильных аппаратов позволяют определить цель использования технических средств при уборке культур и учесть особенности технологического процесса<sup>2</sup> [2].

Основное применение при уборке льна-долгунца получили теробильные аппараты непрерывного действия, включающие теробильные ручьи (секции), спереди оборудованные делителями, выполненными в форме многогранных клиньев, и выводящие расстилочные устройства [9; 12].

Конструкция теробильных ручьев оказывает определяющее влияние на качество и надежность работы аппарата. Теробильные ручьи состоят из прижатых друг к другу бесконечных ремней (ленточно-роликовые различной формы) или из ремней и обрешиненных дисков (ленточно-дисковые), между которыми зажимаются стебли и выдергиваются из

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52784-2007. Лен-долгунец. Термины и определения. М., 2007.

<sup>2</sup> Ковалев М. М. Технологии и машины для комбинированной уборки льна-долгунца : дис. ... д-ра. техн. наук. М., 2010. 499 с.

почвы (рис. 1)<sup>3</sup>. Существует несколько видов этих конструкций:

1. С дугообразным ленточно-роликовым ручьем (рис. 1а). Достоинства: большая зона тербления, обеспечивающая тербление разного по степени полегания льна. Недостатки: низкая надежность технологического процесса, высокая энергоемкость, ограничение по влажности льна, скольжение ремней относительно друг друга на криволинейных участках ручья, повреждения стеблей.

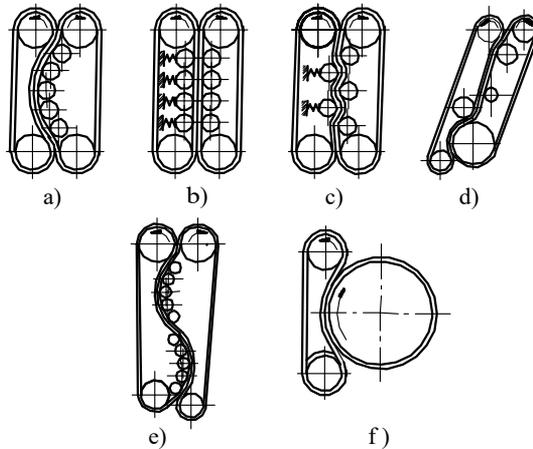
2. С прямолинейным ленточно-роликовым ручьем (рис. 1б). Достоинства: малая энергоемкость, большая зона и симметричный процесс тербления, минимальная растянутость стеблей в ленте. Недостатки: неравномерность распределения давления в ручье, сложность конструкции.

3. С волнообразным ленточно-роликовым ручьем (рис. 1с). Достоинства: большая зона и симметричный процесс тербления растений, надежность технологического процесса, минимальная растянутость стеблей в ленте.

Недостатки: скольжение ремней относительно друг друга на криволинейных участках ручья, повреждение стеблей, износ ремней, большая энергоемкость и сложность конструкции.

4. С криволинейным ленточно-роликовым ручьем (рис. 1д). Достоинства: надежность технологического процесса, небольшая энергоемкость и простота конструкции. Недостатки: неравномерность давления по длине ручья, скольжение ремней относительно друг друга на криволинейных участках ручья, повреждение стеблей и износ ремней, несимметричность процесса тербления.

5. С синусоидальным ленточно-роликовым ручьем (рис. 1е). Достоинства: возможность установки требуемого давления в зоне тербления, и в зоне транспортирования стеблей, небольшая энергоемкость. Недостатки: скольжение ремней относительно друг друга на дугообразных участках ручья, повреждения стеблей, износ ремней, сложность конструкции.



Р и с. 1. Схемы тербильных ручьев льноуборочных машин

F i g. 1. Schemes of pulling channels of flax harvesters

<sup>3</sup> Хайлис Г. А. Теория льноуборочных машин. М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 332 с. URL: [http://www.cnsnb.ru/Vexhib/volk/12\\_11236.pdf](http://www.cnsnb.ru/Vexhib/volk/12_11236.pdf) (дата обращения: 04.01.2022) ; Дударев И. М. Теоретичні основи модернізації машин для виробництва льноу : монографія. Луцьк : Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2015. 268 с. URL: <https://www.researchgate.net/publication/338937093> (дата обращения: 10.03.2021).

6. С ленточно-дисковым ручьем постоянной кривизны (рис. 1f). Достоинства: равномерное распределение давления по длине ручья, отсутствие скольжения ремня по диску, простота конструкции, небольшая мощность для привода. Недостатки: несимметричный процесс тербления растений, надлом стеблей в точке первоначального зажима в ручье.

Апробировано кошение льна-долгунца вместо тербления для снижения затрат на приобретение специализированной техники и ускорения уборочных процессов. Получен отрицательный результат: потери дезорганизованного волокна увеличились, материал не удалось использовать для получения экологически чистых льняных тканей<sup>4</sup> [8; 14].

Ленточно-дисковый тербильный ручей, характеризующийся наиболее простой конструкцией, высокой надежностью технологического процесса и малой мощностью для привода, является наиболее перспективным и эффективным. Он широко используется в большинстве льноуборочных машин: ТЛН-1,5А, ТЛН-1,9П, ТЛН-1,9М<sup>5</sup>.

Недостатком конструкции этих аппаратов является повышенный уровень потерь семян и повреждений стеблей (излом и чрезмерное расплющивание при разделении их технологических потоков). Это обуславливает необходимость ее совершенствования<sup>6</sup> [9].

### Материалы и методы

В процессе исследования применяли методы общего и логического анализа, расчетно-конструктивный,

теоретической механики. Использовали компьютерные программы, теорию вероятности и математическую статистику<sup>7</sup> [4; 5].

Для достижения поставленной цели необходимо понизить силовое воздействие стеблеподводов делителя на подводимые к тербильным ручьям растения льна и устранить разделение технологических потоков при терблении и транспортировке растений. Это позволит повысить качество и надежность работы.

Эксперименты проводили в Федеральном научном центре лубяных культур (г. Тверь). Было изготовлено три льнотербильных аппарата с поперечными ленточно-дисковыми ручьями: ТЛН-1,9П, ТЛН-1,9М (рис. 2, 3) и ТЛН-1,9К (рис. 4). Их агрегатировали с мобильным энерго-средством (трактор Т-25А1). Скорость агрегата в опытах была 1,6–3,0 м/с. Рисунок 2 был использован в одной из предыдущих работ М. М. Ковалева<sup>8</sup>.

Технологические потоки в этих аппаратах движутся в поперечном к движению агрегата направлении и поступают на расстил. При определении влияния параметров и режимов работы льнотербильных аппаратов на показатели качества получаемой продукции исходили из имеющихся инструкций по эксплуатации разных конструкций. При этом объектами исследования стали растения льна-долгунца, стебли, семенные коробочки, семена, процесс тербления, треста, волокно длинное трепанное и опытные тербильные аппараты.

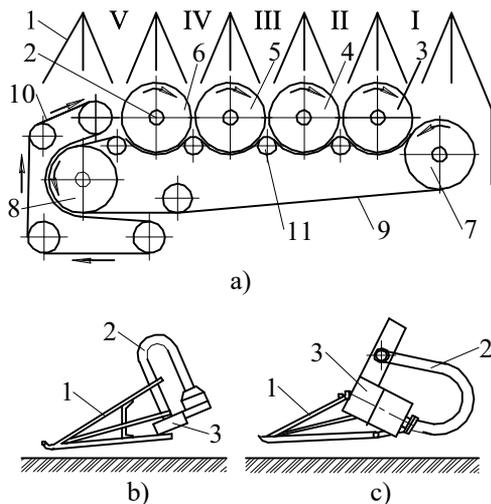
<sup>4</sup> Flax Fiber: Potential for a New Crop in the Southeast / J. A. Foulkp [et al.] // Trends in New Crops and New Uses ; Ed. by J. Janick, A. Whipkey. Alexandria : ASHS Press, 2002. P. 361–370. URL: <https://hort.purdue.edu/newcrop/ncnu02/v5-361.html> (дата обращения: 04.01.2022).

<sup>5</sup> Ковалев М. М. Технологии и машины для комбинированной уборки льна-долгунца.

<sup>6</sup> Хайлис Г. А. Теория льноуборочных машин ; Дударев И. М. Теоретичні основи модернізації машин...

<sup>7</sup> Горлач Б. А. Теория вероятностей и математическая статистика : учебн. пособие для вузов. СПб. : Лань, 2021. 320. с. URL: <https://e.lanbook.com/book/168478> (дата обращения: 05.03.2022) ; Кулаичев А. П. Методы и средства комплексного статистического анализа данных : учебн. пособие. 5-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2022. 484 с. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1815604> (дата обращения: 17.03.2022).

<sup>8</sup> Ковалев М. М. Технологии и машины для комбинированной уборки льна-долгунца.



Р и с. 2. а) Схема льнотеребильных аппаратов с поперечными ленточно-дисковыми ручьями; б) расположение труб рам над теребильными шкивами у ТЛН-1,9П; в) расположение труб рам за теребильными шкивами у ТЛН-1,9М; 1 – делители; 2 – трубы рамы; 3–6 – обрезиненные теребильные шкивы; 7 – ведущий шкив; 8 – ведомый (натяжной) шкив; 9 – ведущий бесконечный ремень; 10 – ведомый выводящий ремень; 11 – нажимные ролики; I–V – зоны теребильных секций

F i g. 2. а) Scheme of flax pulling units with transverse tape-disc pulling channels; б) arrangement of frame pipes above pulling pulleys in THLN-1.9P; в) arrangement of frame pipes behind pulling pulleys in THLN-1.9M; 1 – dividers; 2 – frame pipes; 3–6 – rubberized pulling pulleys; 7 – driving pulley; 8 – driven (tensioning) pulley; 9 – driving endless belt; 10 – driven output belt; 11 – pressure rollers; I–V – pulling section areas



Р и с. 3. Общий вид льнотеребильной машины ТЛН-1,9М с шириной захвата 0,38 м каждой теребильной секции

F i g. 3. General view of the flax pulling machine THLN-1.9M with each pulling section operating width of 0.38 m



Р и с. 4. Общий вид льнотеребильной машины ТЛН-1,9К с шириной захвата 0,25 м каждой теребильной секции

F i g. 4. General view of the flax pulling machine THLN-1.9K with each pulling section operating width of 0.25 m

Предметом исследования являлись закономерности изменения показателей качества работы льнотеребильных аппаратов с поперечными ленточно-дисковыми ручьями.

В лабораторно-полевых опытах использовали сорт льна-долгунца Леннок с урожайностью семян при нормированной влажности  $U_c = 0,3$  т/га и  $U_c = 0,7$  т/га со средней общей длиной стеблей 0,70–0,75 м и густотой стеблестоя 1 055–1 544 шт./м<sup>2</sup>. Уборку льна в эксперименте проводили согласно ГОСТу 33734-2016<sup>9</sup>. Продолжительность вылежки льносоломы в тресту составила 26 суток.

Оценку льнотресты проводили согласно ГОСТам и по разработанной во

Всероссийском научно-исследовательском институте льна методике<sup>10</sup>. Эксперименты проводили в трехкратной повторности.

Для оценки показателя разделяемости растений льна и выявления источников потерь семян был проведен лабораторно-полевой опыт со льном в разных фазах спелости. Фазу спелости льна на делячных посевах определяли по количеству в стеблестое семенных коробочек различной спелости. Это наиболее точный и быстрый способ<sup>11</sup>.

При посеве устанавливали различные нормы высева семян на делянках. Получена густота стеблестоя от 980 до 2 410 растений льна на одном

<sup>9</sup> ГОСТ 33734-2016. Техника сельскохозяйственная. Комбайны и машины для уборки льна. Методы испытаний. М., 2017.

<sup>10</sup> ГОСТ 24383-89. Треста льняная. Требования при заготовках. М., 1998 ; ГОСТ 10330-76. Лен трепаный. Технические условия. М., 1982.

<sup>11</sup> Ковалев М. М. Технологии и машины для комбинированной уборки льна-долгунца.

квадратном метре, которую определяли по известной методике<sup>12</sup>.

Работающий на установленном режиме агрегат останавливали и подсчитывали количество стеблей, находящихся в зоне зажима в теребивильном ручье, но сцепленных коробочками в зоне схода со стеблеподводов делителя.

Показатель разделяемости  $R$  определяли по формуле:

$$R = \left( 1 - \frac{i_{\text{сц}}}{i_0} \right) 100 \%, \quad (1)$$

где  $i_{\text{сц}}$  – количество сцепленных растений, находящихся на участке от их схода со стеблеподводов делителей до начала касания трубы рамы, шт.;  $i_0$  – количество стеблей, находящихся в теребивильном участке ручья, шт.:

$$i_0 = B i S_p \mu, \quad (2)$$

где  $B$  – расстояние между носками делителей, м;  $i$  – густота стеблестоя, шт./м<sup>2</sup>;  $S_p$  – длина теребивильного участка, м;  $\mu$  – показатель скоростного режима ( $\mu = v_m / v_p$ , где  $v_m$  – скорость агрегата, м/с;  $v_p$  – скорость теребивильных ремней, м/с).

Определение влияния ширины захвата теребивильной секции на показатели выхода и качества длинного волокна проводили с использованием теребивильных аппаратов ТЛН-1,9М с шириной захвата 0,38 м каждой теребивильной секции (рис. 3) и ТЛН-1,9К с шириной захвата 0,25 м каждой теребивильной секции (рис. 4).

### Результаты исследования

Оценка процесса теребивления и качества работы льнотеребивильного аппарата ТЛН-1,9П с поперечными ленточно-дисковыми ручьями и расположением труб рамы над теребивильными шкивами показала, что в процессе теребивления

растений льна (стеблей с семенными коробочками) на них одновременно действуют три фактора: подвод растений к теребивильному ручью делителями, зажим стеблей в теребивильных ручьях и разделение их технологических потоков трубами рамы 2 (рис. 2а, 2б). Механическое воздействие труб рамы на растения льна приводит к отрыву семенных коробочек с растений льна, увеличению повреждений стеблей и снижению надежности выполнения технологического процесса.

Для устранения данных недостатков предложено в льнотеребивильном аппарате ТЛН-1,9М с поперечными ленточно-дисковыми ручьями размещать трубы рамы за теребивильными шкивами, что является инновационным техническим решением для аппаратов такого типа (рис. 2с) [15; 16]. При этом условии исключается разделение технологических потоков растений льна, а отрыв семенных коробочек и повреждения стеблей минимальны.

В процессе подвода растений льна делителями к теребивильным ручьям они отклоняются в поперечной и продольной плоскостях, что вызывает комлевую растянутость и перекашивание стеблей в образующейся ленте. Это явление считается негативным, так как оно отрицательно влияет на выход и качество волокна при переработке льнотресты. Поэтому для повышения выхода и качества волокна необходимо уменьшать растянутость стеблей в ленте [17–19].

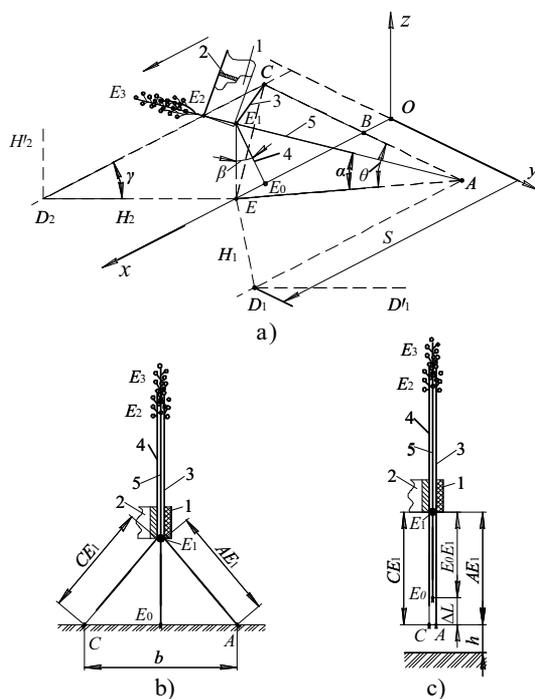
Для более детального анализа образования комлевой растянутости и показателя разделяемости растений льна, а также степени повреждения стеблей, потерь семян, выхода и качества волокна необходимо определить пути уменьшения растянутости, показатели разделяемости растений и провести технологическую оценку волокна.

<sup>12</sup> Там же ; ГОСТ 33734-2016.

На рисунке 5 схематически показано образование комлевой растянутости стеблей, обусловленное особенностями процесса теребления, при котором между теребильным ремнем 1 и дисками 2 одновременно зажимаются стебли  $AE_1E_3$ ,  $CE_1E_3$  и  $E_0E_1E_3$ , корни которых закреплены в точках  $A$ ,  $C$  и  $E_0$  на разных расстояниях  $CE_1$ ,  $AE_1$  и  $E_0E_1$  от точки зажима  $E_1$ . При сборе этих стеблей в элементарный пучок параллельных растений корни их оказываются смещенными друг относительно друга на разные расстояния. Разность

между наибольшим и наименьшим смещением корней является абсолютной комлевой растянутостью  $\Delta L$  стеблей (рис. 5б, 5с).

Анализ влияния делителей на стебли льна без учета сцепления их верхних частей семенными коробочками изложен в ряде работ<sup>13</sup>. Ниже приводится определение комлевой растянутости пучка растений, сцепленных семенными коробочками в зоне  $E_2E_3$ . На схеме (рис. 5а) площадь  $D_2CAD_1$  – горизонтальная поверхность поля, с которой жестко связана система координат  $xOyz$ .



Р и с. 5. Схемы к определению комлевой растянутости  $\Delta L$  стеблей во время их теребления:

- положение растений и проекции стеблеподводов делителя на горизонтальную плоскость;
- элементарный пучок растений при воздействии на них носков делителей;
- в процессе теребления; 1 – теребильный ремень; 2 – теребильный шкив; 3–5 – растения льна

Fig. 5. Schemes for determining the elongation of  $\Delta L$  flax stem base during pulling:

- the position of flax plants and the projection of the divider stem inlets on the horizontal plane;
- an elementary bundle of plants when exposed to the socks of the dividers;
- in the process of pulling; 1 – the pulling belt; 2 – pulley; 3–5 – flax plants

<sup>13</sup> Хайдис Г. А. Теория льноуборочных машин ; Налобина О. О. Механіко-технологічні основи процесів взаємодії робочих органів льнозбирального комбайна з рослинним матеріалом : дис. ... д-ра. техн. наук. Луцьк, 2008. 365 с. URL: <http://www.disslib.org/mekhaniko-teknologichni-osnovy-protsesiv-vzayemodiyi-robochykh-orhaniv-lonozbyralnoho.html> (дата обращения: 04.01.2022).

Делители перемещаются в направлении оси  $x$ , а их носики проходят путь  $S$ . При этом они наклоняют стебли до положения  $AE_1$ ,  $CE_1$  и  $E_0E_1$  их нижних частей.  $D'_1D_1H_1$  и  $H'_2D_2H_2$  проекции делителей на горизонтальную плоскость (для упрощения делители не показаны). На стебли  $AE_1E_3$  и  $CE_1E_3$  действуют стеблеподводы делителей, проекции которых обозначены  $H_2D_2$  и  $H_1D_1$ . Одновременно с этими стеблями через сцепленность наклоняются и расположенные между ними стебли  $E_0E_1E_3$ . На участках  $E_1E_2$  стебли зажимаются в теребивных ручьях.

Линия  $CD_2$  есть линия пересечения продольно-вертикальной плоскости, проходящей через точку  $C$  стебля и носик правого делителя, с горизонтальной плоскостью. Линия  $AD_1$  есть линия пересечения продольно-вертикальной плоскости, проходящей через основу  $A$  стебля и носик левого делителя, с горизонтальной плоскостью. Линия  $OBE_0E$  совпадает с осью  $Ox$  и с линией пересечения продольно-вертикальной плоскости, проходящей через нижнюю точку  $E_1$  теребивного ручья и основы  $E_0$  стебля, с горизонтальной плоскостью.

Так как  $AB = BC$  и  $AE_1 = CE_1$ , то треугольник  $AEE_1$  равен треугольнику  $CEE_1$ . Абсолютная комлевая растянутость  $AE_1 - E_0E_1 = CE_1 - E_0E_1$ .

Для определения зависимости комлевой растянутости  $\Delta L$  воспользуемся зависимостью длин  $AE_1$  и  $E_0E_1$  от высоты теребления, равной  $EE_1 = Z_k$ , и ширины захвата теребивной секции  $AC = b$ . Обозначим угол наклона стебля  $AE_1$  к горизонтали  $\alpha$ , угол наклона линии  $AE$  к линии  $AB$  через  $\theta$ , а угол наклона вперед линии  $E_0E_1$  к вертикали  $\beta$ . Тогда из треугольника  $AE_1E$  следует, что  $AE_1 = EE_1 / \sin\alpha = Z_k / \sin\alpha$ , а из треугольника  $E_0E_1E$  имеем  $E_0E_1 = EE_1 / \sec\beta = Z_k / \sec\beta$ .

С учетом этого

$$\begin{aligned} \Delta L &= AE_1 - E_0E_1 = \\ &= Z_k / \sin\alpha - Z_k / \sec\beta = \\ &= Z_k(1 / \sin\alpha - 1 / \sec\beta). \end{aligned} \quad (3)$$

Угол  $\beta$  зависит от густоты стеблестоя, сцепленности верхушечной части растений льна и наклона рядом находящихся стеблей. Если растения не сцеплены, то для них угол  $\beta$  будет близок к нулю.

Угол  $\alpha$  находится из треугольника  $AEE_1$ :

$$\cos\alpha = AE / AE_1 = b \sin\alpha / 2Z_k \cos\theta,$$

откуда  $\operatorname{tg}\alpha = 2Z_k \cos\theta / b$ .  
Так как  $\sin\alpha = \operatorname{tg}\alpha / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\alpha}$ , то подставим это в (3) и получим:

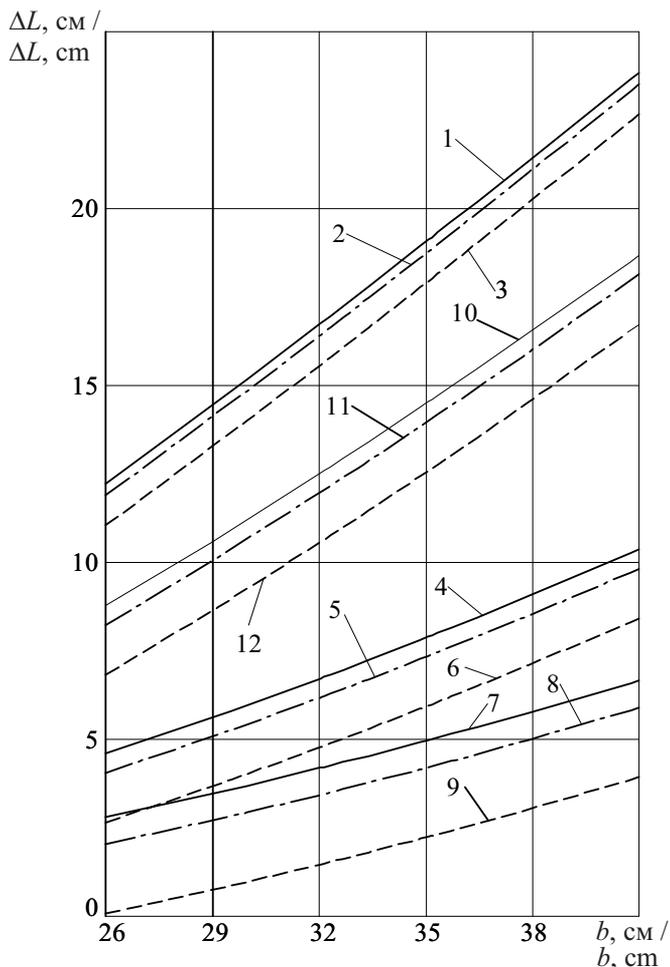
$$\begin{aligned} \Delta L &= \frac{\sqrt{b^2 + 4Z_k^2 \cdot \cos\theta}}{2 \cos\theta} - Z_k \cdot \sec\beta = \\ &= \sqrt{\left(\frac{b}{2 \cos\theta}\right)^2 + Z_k^2} - Z_k \cdot \sec\beta. \end{aligned} \quad (4)$$

Угол  $\theta$  зависит от угла трения скольжения  $\varphi$  стеблеподвода делителя по стеблям и угла отклонения  $\gamma$  стеблеподвода от продольно-вертикальной плоскости (на рисунке 3 угол  $\gamma_0$  показан проекцией угла  $\gamma$  на горизонтальную плоскость)<sup>14</sup>. Угол  $\theta$  приблизительно равен  $\theta = \gamma_0 + \varphi$ .

В соответствии с формулой (4) проведены расчеты и определена комлевая растянутость  $\Delta L$  в зависимости от ширины захвата  $b$  теребивной секции для ряда значений  $Z_k$ ,  $\theta$  и  $\beta$ . Зависимость графически показана на рисунке 6.

Расчеты показали, что комлевая растянутость  $\Delta L$  стеблей увеличивается с ростом угла  $\theta$  и ширины захвата  $b$  секции и уменьшением угла  $\beta$  и высоты  $Z_k$  теребления. Однако с уменьшением ширины захвата  $b$  теребивной секции, при одной и той же ширине захвата теребивного аппарата, будет

<sup>14</sup> Там же.



Р и с. 6. Зависимость комлевой растянутости  $\Delta L$  стеблей от ширины захвата  $b$  теребильной секции при: 1–3 –  $Z_k = 15$  см,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$ ; 4–6 –  $Z_k = 25$  см,  $\theta = 35^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$ ; 7–9 –  $Z_k = 35$  см,  $\theta = 25^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$ ; 10–12 –  $Z_k = 25$  см,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$

F i g. 6. Dependence of the elongation of  $\Delta L$  flax stem base on the operating width  $b$  of the pulling section at: 1–3 –  $Z_k = 15$  см,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$ ; 4–6 –  $Z_k = 25$  см,  $\theta = 35^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$ ; 7–9 –  $Z_k = 35$  см,  $\theta = 25^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$ ; 10–12 –  $Z_k = 25$  см,  $\theta = 45^\circ$ ,  $\beta = 2^\circ, 12^\circ, 22^\circ$

усложняется конструкция теребильного аппарата, увеличится его материалоемкость и трудоемкость обслуживания. В теребильных аппаратах этот параметр можно считать устоявшимся. Он находится в пределах 0,25–0,38 м<sup>15</sup>.

Результаты исследования по определению показателей разделяемости  $R$  растений в процессе выполнения технологического процесса теребильным аппаратом ГЛН-1,9П показаны в таблице 1.

<sup>15</sup> Хайлис Г. А. Теория льноуборочных машин.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Количество сцепленных растений  $i_{сц}$  и показатель их разделяемости  $R$  в теребильном аппарате ТЛН-1,9П (при  $\mu = 1$ ;  $S_p = 0,3$  м;  $b = 0,38$  м)**  
**The number of linked plants  $i_{сц}$  and their separability index  $R$  in the pulling unit THLN-1.9P (when  $\mu = 1$ ;  $S_p = 0.3$  m;  $b = 0.38$  m)**

| Густота стеблестоя $i$ , шт./м <sup>2</sup> / Stem density $i$ , pcs/m <sup>2</sup> | Количество стеблей в теребильном участке ручья $i_0$ , шт. / Number of stems in the pulling section of the pulling channel $i_0$ , pcs | Фазы спелости льна / Phases of ripeness of flax |      |                              |      |                 |      |               |      |
|---|--|---|------|------------------------------|------|-----------------|------|---------------|------|
|   |  | зеленая / green                                 |      | ранняя желтая / early yellow |      | желтая / yellow |      | полная / full |      |
|   |  | $i_{сц}$  | $R$  | $i_{сц}$                     | $R$  | $i_{сц}$        | $R$  | $i_{сц}$      | $R$  |
| 980   | 111,7  | 5   | 95,5 | 6                            | 94,6 | 15              | 86,6 | 30            | 73,2 |
| 1 350   | 153,9  | 10  | 93,5 | 12                           | 92,2 | 24              | 84,4 | 48            | 68,8 |
| 1 930   | 220,0  | 16  | 92,4 | 18                           | 91,8 | 38              | 82,7 | 72            | 67,2 |
| 2 410   | 274,7  | 25  | 90,9 | 30                           | 89,1 | 55              | 80,0 | 98            | 64,3 |

Из таблицы 1 следует, что с увеличением фазы спелости льна количество сцепленных растений  $i_{сц}$  возрастает, а показатель их разделяемости  $R$  резко снижается. В фазе полной спелости на высокоурожайном льне ( $i = 2\ 410$  шт./м<sup>2</sup>) разделяемость растений составляет 64,3 %.

Это значит, что 35,7 % растений не разделяются делителями, а разрываются трубами рамы теребильного аппарата. Так как в фазе полной спелости усилие отрыва семенных коробочек от стеблей наименьшее, по сравнению с фазой ранней желтой спелости, то потери семян при разрыве ленты растений трубами рамы аппарата достигает 12 % (данные Калининской МИС)<sup>16</sup>.

Результаты лабораторно-полевых опытов показали, что для существенного снижения потерь семян необходимо применять льнотеребилки с поперечными ленточно-дисковыми ручьями на тереблении посевов культуры в фазе ранней желтой спелости. В этом случае сцепленность растений наименьшая,

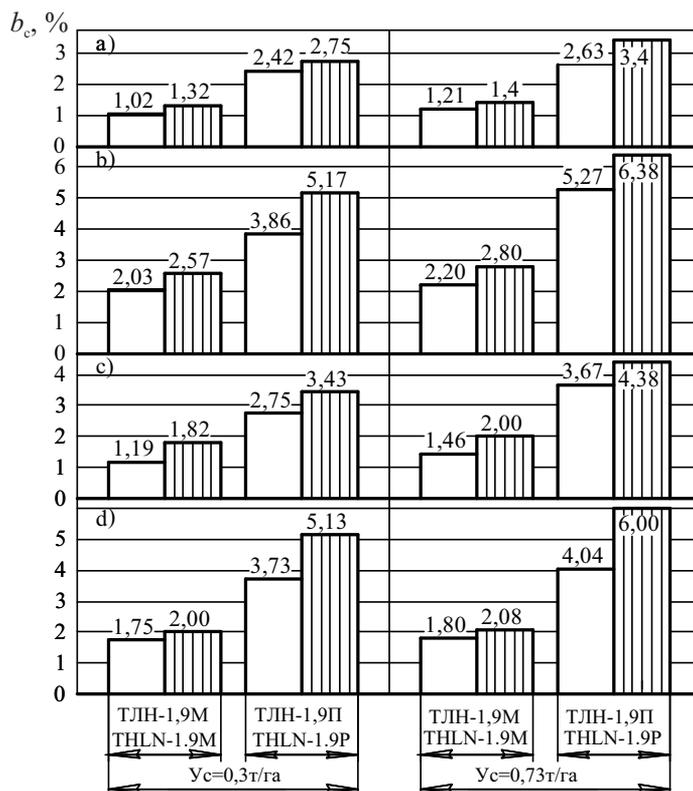
а прочность коробочек и усилие отрыва от стеблей наибольшие.

Основопологающим фактором является изменение конструкции рамы теребильного аппарата путем переноса труб за теребильные шкивы, что исключит разделение технологических потоков при тереблении и транспортировании растений.

Исследования по определению влияния разделения стеблестоя при тереблении льна на потери семян проводили с использованием аппаратов ТЛН-1,9П и ТЛН-1,9М (рис. 2, 3). Результаты экспериментов показаны на рисунке 7.

Из рисунка 7 следует, что при уборке льна аппаратом ТЛН-1,9П потери  $b_c$  семян резко возрастают в сравнении с потерями при использовании ТЛН-1,9М. Рост потерь семян  $b_c$  имеет место во всех вариантах лабораторно-полевого опыта: на низкоурожайном ( $Y_c = 0,3$  т/га) и высокоурожайном ( $Y_c = 0,73$  т/га) льне, в ранней желтой (рис. 7а), желтой (рис. 7с) и полной (рис. 7д) спелостях прямостоящего льна, а также в ранней желтой спелости полеглого льна (рис. 7б).

<sup>16</sup> Там же.



Р и с. 7. Потери семян, допускаемые аппаратами ТЛН-1,9П и ТЛН-1,9М при тереблении льна разной урожайности:  –  $v_m = 1,6$  м/с;  –  $v_m = 2,8$  м/с

F i g. 7. Seed losses when using the pulling units ТЛН-1,9П and ТЛН-1,9М during pulling flax of different yields:  –  $v_m = 1.6$  m/s;  –  $v_m = 2.8$  m/s

Эти потери семян при созревании посевов возрастают, причем наибольшие потери имеют место при тереблении полностью созревшего прямо стоящего льна. При тереблении полегло льна вследствие сцепления растений верхушечной частью и переплетения друг с другом наблюдаются повышенные потери семян. При возрастании скорости агрегата потери семян у теребильных аппаратов увеличиваются, что является следствием более интенсивного воздействия рабочих органов на растения.

Различие результатов по потерям семян между рассматриваемыми теребильными аппаратами

статистически доказуемо. Критерий Фишера:  $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$  ( $8,9 > 3,0$ ).

Экспериментально установлено, что расположение рамы над теребильными шкивами увеличивает потери семян и снижает разрывную нагрузку стеблей, по сравнению с потерями при расположении рамы за теребильными шкивами, что необходимо учитывать при разработке новых технических средств.

В варианте I при  $v_m = 1,6-3,0$  м/с разрывная нагрузка стеблей была равна 23 Н, а в варианте II (ТЛН-1,9М) она составила 25 Н, то есть на 2 Н выше. Средний номер льнотресты в варианте I составил 1,25 номера, а в варианте

II – 1,5 номера. Все это подтверждает уменьшение отрицательного воздействия аппарата ТЛН-1,9М на стебли по сравнению с аппаратом ТЛН-1,9П.

В результате оценки тресты подтверждено, что при использовании аппарата ТЛН-1,9М наблюдаются более высокие показатели выработки и номера длинного волокна (табл. 2). При работе уборочного агрегата на скоростях  $v_m$  1,6–3,0 м/с и ширине захвата теребильной секции  $b$  0,25–0,38 м выход длинного волокна (средний) составил: в варианте I – 11,96 %, а варианте II – 13,26 %, что на 1,3 % выше, чем в варианте I.

Уменьшение ширины захвата (уменьшение комлевой растянутости стеблей) теребильной секции с 0,38 до 0,25 м обеспечивает статистически доказываемое увеличение среднего выхода длинного волокна на 0,35 % в варианте I и на 0,51 % в варианте II. Изменение показателя выхода длинного волокна по вариантам было выше, чем изменение показателя номера длинного волокна (табл. 2). В варианте I номер волокна находится в пределах от 9,12 до 9,53 ед, а в варианте II от 9,71 до 9,80 ед. Таким образом, проведенная технологическая

оценка подтверждает более высокое качество волокна при тереблении посевов аппаратом ТЛН-1,9М.

### Обсуждение и заключение

Проведенные исследования показали, что снижение дополнительных механических воздействий на растения льна путем внесения изменений в конструкцию аппарата с поперечными ручьями эффективно влияет на выполнение технологического процесса: обеспечивает устойчивость теребления растений, снижает потери семян, увеличивает разрывную нагрузку стеблей, номера льнотресты и длинного волокна, процентомера длинного волокна.

Как показывают результаты исследований, увеличение сборов и качества льнопродукции может быть достигнуто с помощью традиционного способа уборки льна (теребление с формированием ленты растений) и его модернизации. Полученные данные свидетельствуют о том, что дополнительное механическое воздействие на растения, возникающее при работе льнотеребильных аппаратов с расположением рам над теребильными шкивами, может быть устранено за счет улучшения конструкции теребильного аппарата.

Таблица 2  
Table 2

Показатели технологической оценки льнотресты в опыте с теребильными аппаратами ТЛН-1,9П и ТЛН-1,9М  
Indicators of technological evaluation of flax straw in the experience with the THLN-1.9P and THLN-1.9M pulling units

| Номер варианта / Option-number | Вариант / Option | Скорость агрегата $v_m$ , м/с / Unit speed $v_m$ , m/s | Длинное волокно / Long fiber |                                |                                   |                             |                                |                                   |
|--------------------------------|------------------|--|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
|                                |                  |  | $b = 0,25$ м / $b = 0.25$ m  |                                |                                   | $b = 0,38$ м / $b = 0.38$ m |                                |                                   |
|                                |                  |  | Выход, % / Output, %         | Средний номер / Average number | Процентономер / Percentage number | Выход, % / Output, %        | Средний номер / Average number | Процентономер / Percentage number |
| I                              | ТЛН-1,9П         | 1,6  | 12,30                        | 9,53                           | 117,2                             | 11,90                       | 9,20                           | 109,5                             |
|                                |                  | 3,0  | 11,97                        | 9,36                           | 112,0                             | 11,68                       | 9,12                           | 106,5                             |
| II                             | ТЛН-1,9М         | 1,6  | 13,50                        | 9,80                           | 132,3                             | 13,00                       | 9,71                           | 126,2                             |
|                                |                  | 3,0  | 13,46                        | 9,78                           | 131,6                             | 12,95                       | 9,69                           | 125,5                             |

Для этого нужно перенести его раму за теребильные шкивы, что позволит устранить разделение технологических потоков растений при их тереблении и транспортировании.

Применение льнотеребильного аппарата ТЛН-1,9М в фазе ранней желтой спелости позволяет снизить потери семян на 1,4–2,0 %. При этом выработка длинного волокна была равна 13,23 %, а его номер составил 9,7 ед, что, в сравнении с аппаратом ТЛН-1,9П, выше на 1,3 % и на 0,25 ед соответственно.

Результаты исследования и испытаний теребильного аппарата ТЛН-1,9М были использованы специалистами Калининской МИС и Федерального научного центра лубяных культур для выпуска опытной партии таких аппаратов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основные проблемы научного обеспечения льноводства / Р. А. Ростовцев [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 3. С. 45–52. doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
2. Галкин А. В., Фадеев Д. Г., Ущиповский И. В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 389–399. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
3. Akin D. E. Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax [Электронный ресурс] // International Scholarly Research Notices. 2013. doi: <https://doi.org/10.5402/2013/186534>
4. Методика определения закономерности растяжения группы стеблей растительных материалов / Ю. Ф. Лачуга [и др.] // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 1. С. 67–71. doi: <https://doi.org/10.31857/S2500262721010166>
5. A Method for Determining Stretching Patterns of a Group of Stems in Plant Materials / Yu. F. Lachuga [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2021. Vol. 47. P. 182–187. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068367421020129>
6. Головачук І. П., Величко В. Л. Аналіз математичної моделі стебла льону // Сільськогосподарські машини. 2017. № 38. С. 27–34. URL: [https://forum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/84/ВИПУСК\\_38](https://forum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/84/ВИПУСК_38) (дата обращения: 10.03.2021).
7. Результаты исследований сопротивления растительных материалов изгибу при взаимодействии с рабочими органами уборочных машин / М. М. Ковалев [и др.] // Наука в Центральной России. 2021. № 2. С. 5–12. doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-2-5-12>
8. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting / J. Mańkowski [et al.] // Journal of Natural Fibers. 2018. Vol. 15, Issue 1. P. 53–61. doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
9. Ковалев М. М., Перов Г. А., Просолов С. В. Анализ работы делителей в трудных условиях уборки // Техника и оборудование для села. 2020. № 11. С. 20–24. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-11-20-24>
10. Поздняков Б. А. Актуальные направления совершенствования системы машин для уборки льна-долгунца // Техника и оборудование для села. 2019. № 8. С. 2–6. doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-8-2-6>
11. Толстушко М. М., Толстушко Н. О., Юхимчук С. М. Аналіз роботи вивідного пристрою льнозбиральної машини // Сільськогосподарські машини. 2019. № 43. С. 134–138. doi: <https://doi.org/10.36910/agromash.vi43.212>
12. Ростовцев Р. А., Черников В. Г., Ущиповский И. В. Основные направления модернизации льняного агропромышленного комплекса России // Вестник аграрной науки. 2019. № 1. С. 19–30. doi: <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.1.19>

13. Юхимчук С. Ф., Дацюк Л. М., Сацюк В. В. Визначення повертання стебел льону в ривчаках брального апарату // Сільськогосподарські машини. 2017. № 38. С. 27–34. URL: [https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/82/ВИПУСК\\_36](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/82/ВИПУСК_36) (дата обращения: 10.03.2021).

14. Dudarev I., Say V. Development of Resource-Saving Technology of Linseed Harvesting // Journal of Natural Fibers. 2020. Vol. 17, Issue 9. P. 1307–1316. doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1558161>

15. Льнотеребилка : патент 2086090 Российская Федерация / Ковалев М. М. [и др.]. № 92015298 ; заявл. 29.12.1992 ; опубл. 10.08.1997. 5 с.

16. Льнотеребилка : патент 2321203 Российская Федерация / Ковалев М. М. [и др.]. № 2006123820 ; заявл. 15.07.2006 ; опубл. 10.04.2008. 6 с.

17. Зинцов А. Н., Соколов В. Н. Разработка и исследование процесса уменьшения растянутости стеблей льна-долгунца в ленте // Аграрный вестник Нечерноземья. 2021. № 4. С. 29–35.

18. Dudarev I. A Review of Fibre Flax Harvesting: Conditions, Technologies, Processes and Machines [Электронный ресурс] // Journal of Natural Fibers. 2020. Vol. 12, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1863296>

19. Зинцов А. Н., Ковалев М. М., Перов Г. А. Вероятностная модель кинематики устройства для уменьшения растянутости стеблей льна-долгунца в ленте // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 1. С. 126–144. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.126-144>

*Поступила 17.05.2022; одобрена после рецензирования 13.06.2022; принята к публикации 20.06.2022*

*Об авторах:*

**Ростовцев Роман Анатольевич**, директор Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), доктор технических наук, профессор РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>, Researcher ID: [AIE-3974-2022](https://orcid.org/AIE-3974-2022), [r.rostovcev@fncl.ru](mailto:r.rostovcev@fncl.ru)

**Ковалев Михаил Михайлович**, главный научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>, Researcher ID: [AAT-4775-2021](https://orcid.org/AAT-4775-2021), [m.kovalev@fncl.ru](mailto:m.kovalev@fncl.ru)

**Перов Геннадий Анатольевич**, ведущий научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>, Researcher ID: [AAB-5326-2022](https://orcid.org/AAB-5326-2022), [g.perov@fncl.ru](mailto:g.perov@fncl.ru)

**Просолов Сергей Викторович**, младший научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5879-905X>, Researcher ID: [GPF-8674-2022](https://orcid.org/GPF-8674-2022), [tver.dep.sela@rambler.ru](mailto:tver.dep.sela@rambler.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Р. А. Ростовцев – формулирование концепции решения, постановка задачи, анализ результатов исследования.

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

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

С. В. Просолов – подготовка и анализ литературных данных, проведение исследований и обработка экспериментальных данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The Main Problems of Scientific Support of Flax Growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):45–52. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
2. Galkin A.V., Fadeev D.G., Uschapovsky I.V. Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(3):389–399. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
3. Akin D.E. Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax. *International Scholarly Research Notices*. 2013. doi: <https://doi.org/10.5402/2013/186534>
4. Lachuga Yu.F., Kovalev M.M., Perov G.A., Galkin A.V. Method for Determining the Pattern of Stretching Groups of Stems of Plant Materials. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*. 2021;(1):67–71. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S2500262721010166>
5. Lachuga Yu.F., Kovalev M.M., Perov G.A., Galkin A.V. A Method for Determining Stretching Patterns of a Group of Stems in Plant Materials. *Russian Agricultural Sciences*. 2021;47:182–187. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068367421020129>
6. Golovachuk I.P., Velychko V.L. Analysis of Mathematical Model of Flax Stem. *Agricultural Machines*. 2017;(38):27–34. Available at: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/84/ВИПІУСК 38> (accessed 10.03.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)
7. Kovalev M.M., Prosolov S.V., Perov M.G., Shishin D.A. Method for Determining the Pattern of Stretching Groups of Stems of Plant Materials. *Science in the Central Russia*. 2021;(2):5–12. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-2-5-12>
8. Mańkowski J., Maksymiuk W., Sychalski G., et al. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2018;15(1):53–61. doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
9. Kovalev M.M., Perov G.A., Prosolov S.V. Analysis of Separator Operation in Difficult Harvesting Conditions. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(11):20–24. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-11-20-24>
10. Pozdnyakov B.A. Up-to-Date Areas of Improving the System of Machines for Harvesting Fiber Flax. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2019;(8):2–6. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-8-2-6>
11. Tolstushko M.M., Tolstushko N.O., Yukhimchuk S.M. Analysis of the Output of the Flax Harvester Output Device. *Agricultural Machines*. 2019;(43):134–138. (In Ukr., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.36910/agromash.vi43.212>
12. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Uschapovsky I.V. Main Directions of the Modernization of the Flax Agroindustrial Complex of Russia. *Bulletin of Agrarian Science*. 2019;(1):19–30. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2019.1.19>
13. Yukhymchuk S.F., Datsyuk L.M., Satsiuk V.V. Definitions Turn the Stalks of Flax in the Streams Pulling Apparatus. *Agricultural Machines*. 2017;(38):27–34. Available at: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/issue/view/82/ВИПІУСК 36> (accessed 10.03.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)
14. Dudarev I., Say V. Development of Resource-Saving Technology of Linseed Harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2020;17(9):1307–1316. doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1558161>
15. Kovalev M.M., Brotsman A.I., Chernikov V.G., et al. [Flax Pulling Machine]. Patent 2,086,090 Russian Federation. 1997 August 10. 5 p. (In Russ.)
16. Kovalev M.M., Khaylis G.A., Prosolov S.V., et al. [Flax Pulling Machine]. Patent 2,321,203 Russian Federation. 2008 April 10. 6 p. (In Russ.)
17. Zintsov A.N., Sokolov V.N. [Development and Research of the Process of Reducing the Stretching of Flax Stems in the Tape]. *Agorny vestnik Nechernozemya*. 2021;(4):29–35. (In Russ.)
18. Dudarev I. A Review of Fibre Flax Harvesting: Conditions, Technologies, Processes and Machines. *Journal of Natural Fibers*. 2020;12(2). doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1863296>

19. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Probabilistic Model of the Kinematics of the Device for Reducing Elongation of Flax Fiber Stems in the Tape. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):126–144. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.126-144>

*Submitted 17.05.2022; approved after reviewing 13.06.2022; accepted for publication 20.06.2022*

*About the authors:*

**Roman A. Rostovtsev**, Director, Federal Scientific Center for Bast Crops (17/56 Komsomolskiy Prospect, Tver 170041, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>, Researcher ID: AIE-3974-2022, r.rostovcev@fncl.ru

**Mikhail M. Kovalev**, Chief Scientist, Federal Scientific Center for Bast Crops (17/56 Komsomolskiy Prospect, Tver 170041, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>, Researcher ID: AAT-4775-2021, m.kovalev@fncl.ru

**Gennady A. Perov**, Leading Researcher, Federal Scientific Center for Bast Crops (17/56 Komsomolskiy Prospect, Tver 170041, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>, Researcher ID: AAB-5326-2022, g.perov@fncl.ru

**Sergey V. Prosolov**, Researcher, Federal Scientific Center for Bast Crops (17/56 Komsomolskiy Prospect, Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5879-905X>, Researcher ID: GPF-8674-2022, tver.dep.sela@rambler.ru

*Contribution of the authors:*

R. A. Rostovtsev – formulation of the concept of research, problem statement, analysis of research results.

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

G. A. Perov – determination of research methodology, collection and analysis of materials on the topic of research, conducting research, finalizing the text.

S. V. Prosolov – preparation and analysis of literature data, research and processing of experimental data.

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

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

УДК 621.436

doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.373-389

Научная статья



## Применение рапсового масла и этанола в дизельном двигателе

**В. А. Лиханов** , **О. П. Лопатин***Вятский государственный агротехнологический университет  
(г. Киров, Российская Федерация)* *lihanov.va@mail.ru*

### Аннотация

*Введение.* Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания позволяют не только снизить вредное воздействие отработавших газов на окружающую среду без применения дорогостоящих систем очистки, но и диверсифицировать рынок топлива, сокращая потребление невозобновляемых источников энергии, а научные исследования, направленные на применение альтернативных топлив, позволяют выявить наиболее оптимальные варианты замены невозобновляемому сырью. Цель исследования – изучить, как добавление этанола в штатный тракторный дизель с объемным смесеобразованием и сгоранием от факела запального рапсового масла влияет на работу двигателя, а также оптимизировать отдельные цикловые поддачи для получения максимального энергетического и экологического эффекта.

*Материалы и методы.* Статья посвящена описанию результатов применения рапсового масла и этанола в серийном тракторном дизеле размерности 2Ч 10,5/12,0 с организацией раздельного впрыска топлива непосредственно в камеру сгорания. В ходе экспериментальных исследований проведены индицирование рабочего процесса, измерения расхода топлива и потребления воздуха, отбор проб отработавших газов для исследования состава газа и определения содержания токсичных компонентов и дымности.

*Результаты исследования.* Определена точная цикловая подача этанола и рапсового масла, получены величины среднего эффективного давления, осредненной температуры газов в цилиндре, активного и полного тепловыделения. Показано, что с увеличением цикловой подачи этанола доля тепла от кинетического сгорания возрастает, а для дизельного процесса характерна обратная тенденция – увеличение доли диффузионного сгорания с ростом нагрузки. Проведен анализ внутрицилиндровых процессов при работе на этаноле и рапсовом масле в сопоставлении с традиционным дизельным процессом.

*Обсуждение и заключение.* Применение рапсового масла и этанола способно полностью заместить традиционное топливо нефтяного происхождения для действующего дизельного двигателя путем установки дополнительного топливного оборудования

© Лиханов В. А., Лопатин О. П., 2022

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

и модификации головки блока цилиндров (монтаж дополнительной форсунки). При этом существенно улучшаются экологические показатели работы дизеля.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, этанол, рапсовое масло, сгорание, тепловыделение, токсичность, отработавшие газы

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

**Для цитирования:** Лиханов В. А., Лопатин О. П. Применение рапсового масла и этанола в дизельном двигателе // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 373–389. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.373-389>

Original article

## Usage of Rapeseed Oil and Ethanol in a Diesel Engine

V. A. Likhanov , O. P. Lopatin

*Uyatka State Agrotechnological University (Kirov, Russian Federation)*

 [lihanov.va@mail.ru](mailto:lihanov.va@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Alternative fuels in IC-engines make it possible to reduce the harmful effects of exhaust gases on the environment without the use of expensive cleaning systems, diversify the fuel market, and reduce the consumption of non-renewable energy resources, while research aimed at studying the use of alternative fuels makes it possible to find optimal options for replacing non-renewable raw materials. The purpose of the work is to study the effect of using ethanol in a standard tractor diesel engine with volumetric mixing and combustion from flare resulting from the autoignition of a rapeseed oil pilot portion and to optimize separate cyclic fuel deliveries to obtain maximum energy and environmental effect.

**Materials and Methods.** The article deals with the description of the results of the use of rapeseed oil and ethanol in a serial tractor diesel engine of dimension 2F 10.5/12.0 with separate fuel injection directly into the combustion chamber. In the course of experimental studies, the working process was indicated by a piezo quartz pressure sensor installed in the cylinder head, fuel and air consumption were measured, and samples of exhaust gases to study the gas composition and determine the content of toxic components and smokiness were taken.

**Results.** The exact ethanol and rapeseed oil delivery was determined; the values of the average effective pressure, the average temperature of gases in the cylinder, and active and full heat generation were obtained. It is shown that with an increase in the cyclic ethanol delivery, the proportion of heat from kinetic combustion increases, while the diesel process is characterized by an increase in the proportion of diffusion combustion when the load increases. The analysis of the processes inside the cylinder when the engine runs on ethanol and rapeseed oil in comparison with the traditional diesel process is carried out.

**Discussion and Conclusion.** The use of rapeseed oil and ethanol can completely replace the traditional fuel of petroleum origin for an operating diesel engine by installing additional fuel equipment and modifying the head of cylinder block through mounting an additional nozzle. In this case, the environmental performance of the diesel engine improves significantly.

**Keywords:** diesel engine, ethanol, rapeseed oil, combustion, heat generation, toxicity, exhaust gases

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

**For citation:** Likhanov V.A., Lopatin O.P. Usage of Rapeseed Oil and Ethanol in a Diesel Engine. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):373–389. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.373-389>

## Введение

Неуклонный рост потребления ископаемых энергоресурсов нефтегазовой отрасли может привести к энергетическому кризису. Данная проблема стимулирует ученых исследовать и внедрять альтернативные возобновляемые источники энергии, использование которых может значительно снизить нагрузку на экологическую систему [1].

Технические средства разнообразны по конструкции и организации рабочего процесса. Впрыск топлива в них может быть осуществлен как по классическому, так и по достаточно сложному, а иногда и индивидуальному закону топливоподачи. Все это приводит к расширению спектра возможностей применения и исследования альтернативного топлива с определенными физико-химическими свойствами. Возможно, один из видов такого топлива значительно улучшит эксплуатационные и экологические характеристики работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Работы, посвященные данной научной проблеме, перспективны, поскольку их результаты помогут обеспечить не только снижение вредного воздействия процесса сгорания топлива в двигателе на окружающую среду, но и позволят диверсифицировать рынок топлива, сокращая потребление традиционных источников энергии. Таким образом, исследование работы дизелей на альтернативных топливах одновременно направлено на решение двух глобальных проблем: истощение сырьевых энергетических ресурсов и загрязнение окружающей среды вредными выбросами силовых установок.

Известно, что в отработавших газах (ОГ) дизелей, работающих на нефтяном топливе, присутствует более 280 токсичных компонентов разной степени опасности, среди которых наиболее вреден несгоревший

сконденсированный углерод, попадающий из камеры сгорания (КС) двигателя в атмосферу в виде частиц сажи. Он имеет активную разветвленную поверхность, на которой конденсируются опасные вещества, образующиеся при сгорании топлива в КС. Среди них наибольшую угрозу представляют молекулы полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [2].

Существует множество методов и способов снижения токсичности и дымности ОГ ДВС. Но если мы дополнительно ставим задачу экономии нефтяных энергоносителей, то выход в данной ситуации один – применение альтернативного топлива. Оно вследствие особенностей своего физико-химического состава и физических свойств при горении в условиях КС менее склонно к образованию сажи [3–6]. Таким альтернативным топливом являются спирты и растительные масла. Но использовать их можно только после проведения исследований и испытаний.

Поэтому исследования, посвященные влиянию альтернативных топлив на экологические и эффективные показатели работы дизелей, являются важной научной задачей. Положительные результаты исследований докажут возможность широкого применения нетрадиционных источников энергии в будущем [7].

Цель исследования – изучить, как добавление этанола в штатный тракторный дизель с объемным смесеобразованием и сгоранием от факела запального рапсового масла влияет на работу двигателя, а также оптимизировать отдельные цикловые подачи для получения максимального энергетического и экологического эффекта.

## Обзор литературы

На сегодняшний день самым распространенным биологическим топливом в мире является биоэтанол, составляющий более 80 % от общего

количества биотоплива, производимого из биологического сырья. Обеспеченность России биоэтанолом не вызывает опасений, поскольку сырьем для его производства служит не только сахаро- и крахмалосодержащий продукт, но и целлюлозосодержащая основа (различные отходы переработки древесины, зерна, соломы и др.). Что касается топливного этанола, то его производят методами укороченной дистилляции. При этом в нем содержатся сивушные масла, метанол, даже бензин, но зато он дешевле и более конкурентоспособный в экономическом плане. Эти критерии могут благоприятно сказаться на применении биоэтанола в ДВС [8].

Но масштабное внедрение этилового спирта как альтернативного топлива для дизеля ограничено вследствие его низкой самовоспламеняемости (цетановое число в 5 раз ниже дизельного топлива (ДТ)). Поэтому наряду с использованием этанола в дизеле необходимы дополнительные мероприятия или методы: применение специальных присадок, изменение геометрии или объема КС, повышение температуры заряда, степени сжатия, применение специальных средств воспламенения и др. [9–12].

Проблемы применения спиртовых топлив в дизелях подробно рассмотрены в многочисленной специальной литературе [13–16]. Ужесточение норм вредных выбросов вынуждает разработчиков дизелей как использовать специальные меры, воздействующие на процесс сгорания, так и комплектовать систему выпуска дополнительными модулями очистки ОГ. Все эти системы снижают термический и эффективный КПД дизеля, усложняют конструкцию двигателя и повышают стоимость его обслуживания [17–20].

Правильная организация процесса подачи топлива обеспечивает повышение КПД работы двигателя [21–23]. Использование отдельных систем топливоподачи увеличивает число регулировочных параметров, делает работу двигателя более адаптивной, расширяет диапазон рабочих нагрузочных и скоростных режимов. Решение задачи оптимизации подачи топлива по опережению, продолжительности и давлению впрыскивания требует значительного объема экспериментальных исследований, поскольку численные методы пока не позволяют добиться удовлетворительных результатов и нуждаются в проверке<sup>1</sup> [24; 25].

В качестве альтернативных энергетических источников легко могут применяться топлива с существенно более низким цетановым числом, воспламенение которых в КС может быть организовано различными способами. Наиболее эффективен метод с непосредственным впрыском в КС топливом отдельными форсунками. Такой метод повышает надежность и скорость воспламенения топлива в цилиндре за счет пересечения факелов распыленного топлива [26; 27]. Регулируя установочный угол опережения впрыскивания топлива (УУОВТ), можно добиться приемлемой жесткости работы двигателя, минимальной токсичности ОГ и высокой эффективности сгорания и тепловыделения [28; 29]. Однако использование такого метода организации рабочего процесса не позволяет полностью исключить использование невозобновляемого топлива. ДТ может быть без существенной модернизации двигателя заменено возобновляемым биотопливом на основе рапсового масла. Полное замещение дизельного топлива с использованием штатной

<sup>1</sup> Лиханов В. А., Козлов А. Н. Моделирование сажевыделения в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на альтернативных топливах. Киров : Вятская ГСХА, 2019. 157 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42742551> (дата обращения: 04.04.2022).

системы топливоподачи ухудшает эффективность процесса сгорания. Отмечается появление нагара на поверхности камеры сгорания, поскольку вязкость рапсового масла существенно выше [30–33]. Рапсовое масло может быть использовано в качестве запального топлива, которое в камере сгорания дизеля служит для воспламенения основного спиртового топлива и впрыскивается незначительными порциями. Это позволяет избежать появления нагара на поршне и распылителе форсунки. Исследование возможности организации подобной системы питания двигателя с воспламенением от сжатия проведены на кафедре тепловых двигателей, автомобилей и тракторов в Вятском ГАТУ [7; 11; 15; 34].

#### Материалы и методы

Экспериментальный образец дизеля воздушного охлаждения 2Ч 10,5/12,0 был переоборудован для работы на

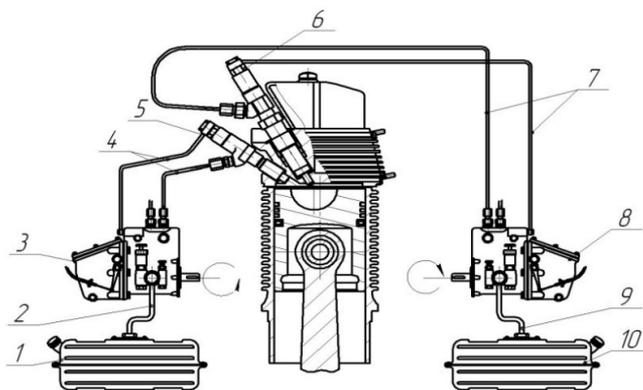
этиловом спирте и рапсовом масле (РМ) с использованием отдельных систем топливоподачи. Дизель оснащен полусферической камерой сгорания в поршне. Этанол использовался в качестве основного топлива и воспламенялся от поступающей в КС дизеля струи РМ. Этиловый спирт имеет меньшую теплотворную способность, по сравнению с дизельным топливом, следовательно, возникла потребность корректировать цикловую подачу топлива в сторону увеличения (табл.).

Впрыск РМ для воспламенения этанола осуществлялся с помощью специальной топливоподающей системы с штифтовой форсункой, которая создает конус распыленного топлива с углом в основании 45–50 градусов. Для этого в штатных головках цилиндра сверлились отверстия для монтажа установочных штифтов и форсунки (рис. 1).

Т а б л и ц а  
Table

**Физические свойства топлив**  
**Physical properties of fuels**

| Наименование / Name   | ДТ / Diesel    | РМ / Rapeseed oil | Этанол / Ethanol |
|---|----------------|-------------------|------------------|
| Молекулярная формула / Molecular formula  | $C_{14}H_{30}$ | $C_{18}H_{34}O_2$ | $C_2H_5OH$       |
| Цетановое число / Cetane number   | 46             | 39                | 8                |
| Молекулярный вес, г/моль /<br>Molecular weight, g/mol   | 198            | 282               | 46               |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> / Density, kg/m <sup>3</sup>   | 820            | 917               | 789              |
| Низшая теплотворная способность, МДж/м <sup>3</sup> /<br>Lower calorific value, MJ/m <sup>3</sup> | 42,4           | 37                | 26,7             |
| Температура самовоспламенения, °С /<br>Autoignition temperature, °С                               | 220            | 318               | 420              |
| Стехиометрическое соотношение воздуха и топлива /<br>Stoichiometric air-fuel ratio                | 14,3           | 12,6              | 9                |
| Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с /<br>Kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /s          | 4              | 42,1              | 1,5              |
| Содержание углерода, % / Carbon content, %  | 0,864          | 0,776             | 0,52             |
| Содержание водорода, % /<br>Hydrogen content, %   | 0,121          | 0,116             | 0,13             |
| Содержание кислорода, % / Oxygen content, %   | 0,0095         | 0,109             | 0,35             |



Р и с. 1. Схема раздельной системы подачи топлив:

1, 10 – топливные баки; 2, 9 – топливопроводы низкого давления;  
3, 8 – топливные насосы высокого давления; 4, 7 – топливные магистрали высокого давления;  
5 – форсунка запального топлива (РМ); 6 – штатная форсунка для подачи этанола

Fig. 1. Diagram of a separate fuel supply system: 1, 10 – fuel tanks; 2, 9 – low pressure fuel lines;  
3, 8 – high-pressure fuel pumps; 4, 7 – high-pressure fuel lines; 5 – ignition fuel nozzle (rapeseed oil);  
6 – standard nozzle for ethanol supply

В ходе экспериментальных исследований проводилось индицирование рабочего процесса с помощью пьезокварцевого датчика давления, установленного в головке цилиндра, измерение расхода топлива и потребления воздуха, отбирались пробы ОГ для исследования состава газа, определялось содержание токсичных компонентов и дымности. Полученная от датчика давления многоцикловая индикаторная диаграмма усреднялась путем наложения сигнала за 10-секундный испытательный цикл с периодом в два оборота коленчатого вала двигателя. Для корректного наложения графиков использовался индуктивный датчик верхней мертвой точки (ВМТ). По осредненной индикаторной диаграмме определяли среднее эффективное давление, частоту вращения коленчатого вала, осредненную температуру газов в цилиндре, тепловыделение. По измерениям весов определялась точная цикловая подача этанола и рапсового масла. Анализ внутрицилиндровых

процессов проводился в сопоставлении с традиционным дизельным процессом. При проведении испытаний на дизельном топливе на двигатель были установлены серийные головки цилиндров.

#### Результаты исследования

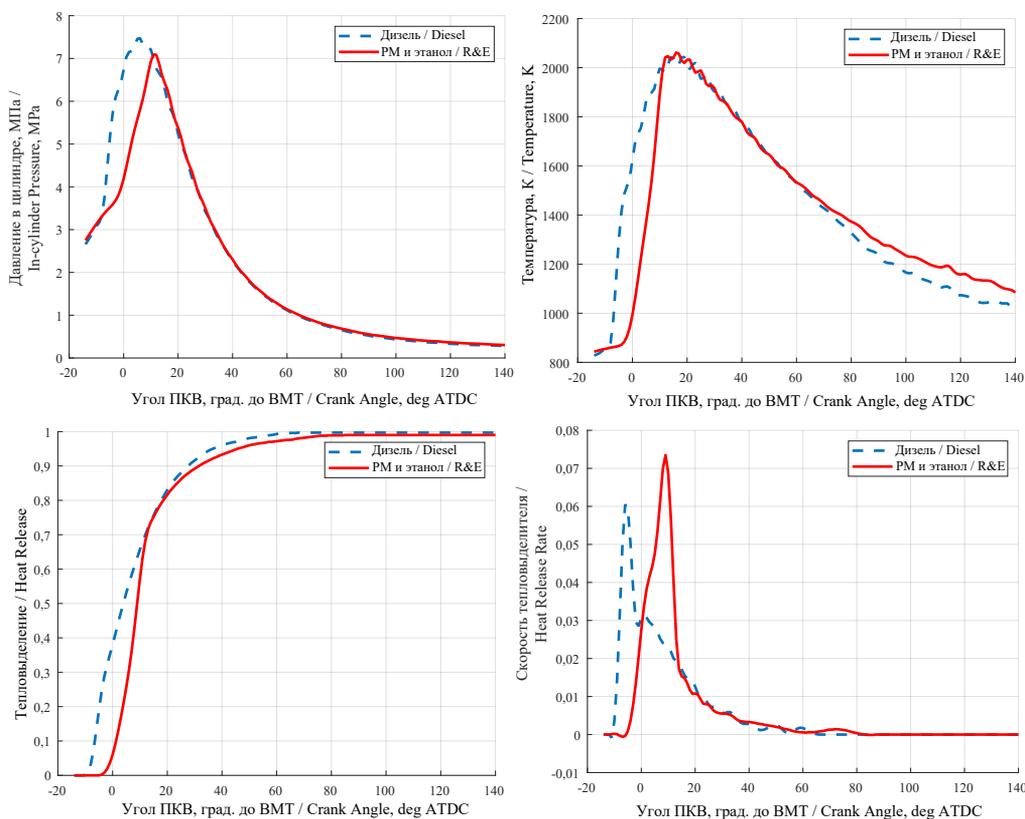
Результаты стендовых испытаний работы дизеля на номинальном режиме при частоте вращения коленчатого вала  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и среднем эффективном давлении  $p_e = 0,588 \text{ МПа}$  приведены на рисунке 2. УУОВТ (дизельного) составлял 30 градусов до ВМТ и 34 градуса до ВМТ для этанола и рапсового масла. Несмотря на ранний впрыск, РМ воспламеняется в КС дизеля существенно позднее. Индукционный период сгорания и период задержки воспламенения (ПЗВ) увеличиваются, поскольку температура самовоспламенения на 100 К для РМ выше, чем для ДТ, следовательно, процесс сгорания смещается на более поздние углы поворота коленчатого вала (ПКВ). Максимальное давление

сгорания составляет при работе двигателя на РМ и этаноле 7,1 МПа, при 11,5 градуса ПКВ после ВМТ. При работе дизеля на ДТ максимальное давление газов в цилиндре составляет 7,43 МПа при 5,7 градуса ПКВ.

Цикловая подача этилового спирта в КС дизеля составляет 52 мг/цикл, а подача запального РМ 13 мг/цикл. Цикловая подача ДТ при соответствующей нагрузке на двигатель составила 41,2 мг/цикл. РМ обладает большей кинематической вязкостью, что повышает дальнобойность топливного факела в цилиндре. По-видимому, часть запального топлива сгорает, испаряясь со стенок камеры сгорания,

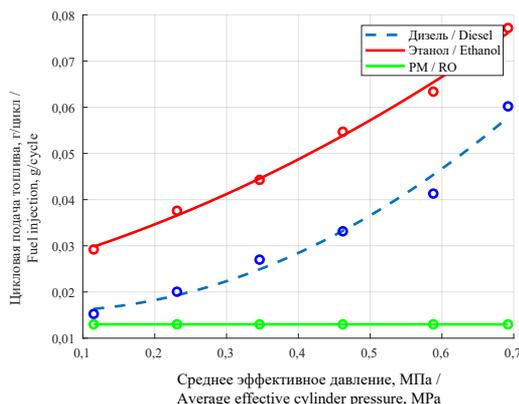
за счет чего повышается скорость тепловыделения после 40 градусов ПКВ. Спиртовое топливо сгорает в кинетическом режиме, продолжительность интенсивного тепловыделения составляет около 20 градусов ПКВ. Быстрое тепловыделение сразу после ВМТ повышает эффективность цикла, не вызывая увеличение жесткости процесса сгорания. Это создает возможность форсирования дизеля путем увеличения цикловой подачи этилового спирта в КС без появления критических давлений в цилиндре.

Изменение нагрузки на тормозном стенде производилось регулировкой цикловой подачи этанола (рис. 3).



Р и с. 2. Характеристики сгорания топлива в цилиндре дизеля

F i g. 2. Characteristics of fuel combustion in a diesel cylinder



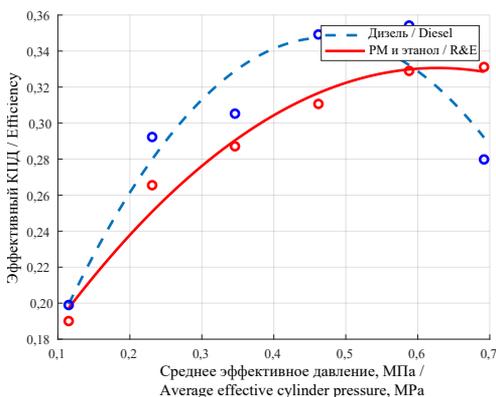
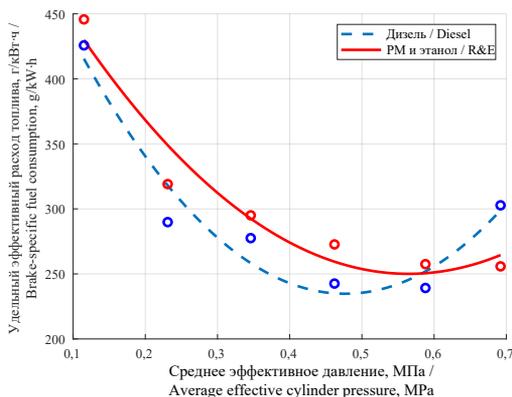
Р и с. 3. Цикловые подачи топлив при различных нагрузках  
F i g. 3. Cyclic fuel delivery at various loads

При таком условии количество запального топлива в цилиндре оставалось всегда постоянным. На режимах частичной нагрузки использование альтернативных топлив приводит к существенному снижению эффективности работы двигателя. Повышается удельный эффективный расход топлива, существенно снижается эффективный КПД, растет задержка воспламенения, увеличивается продолжительность сгорания.

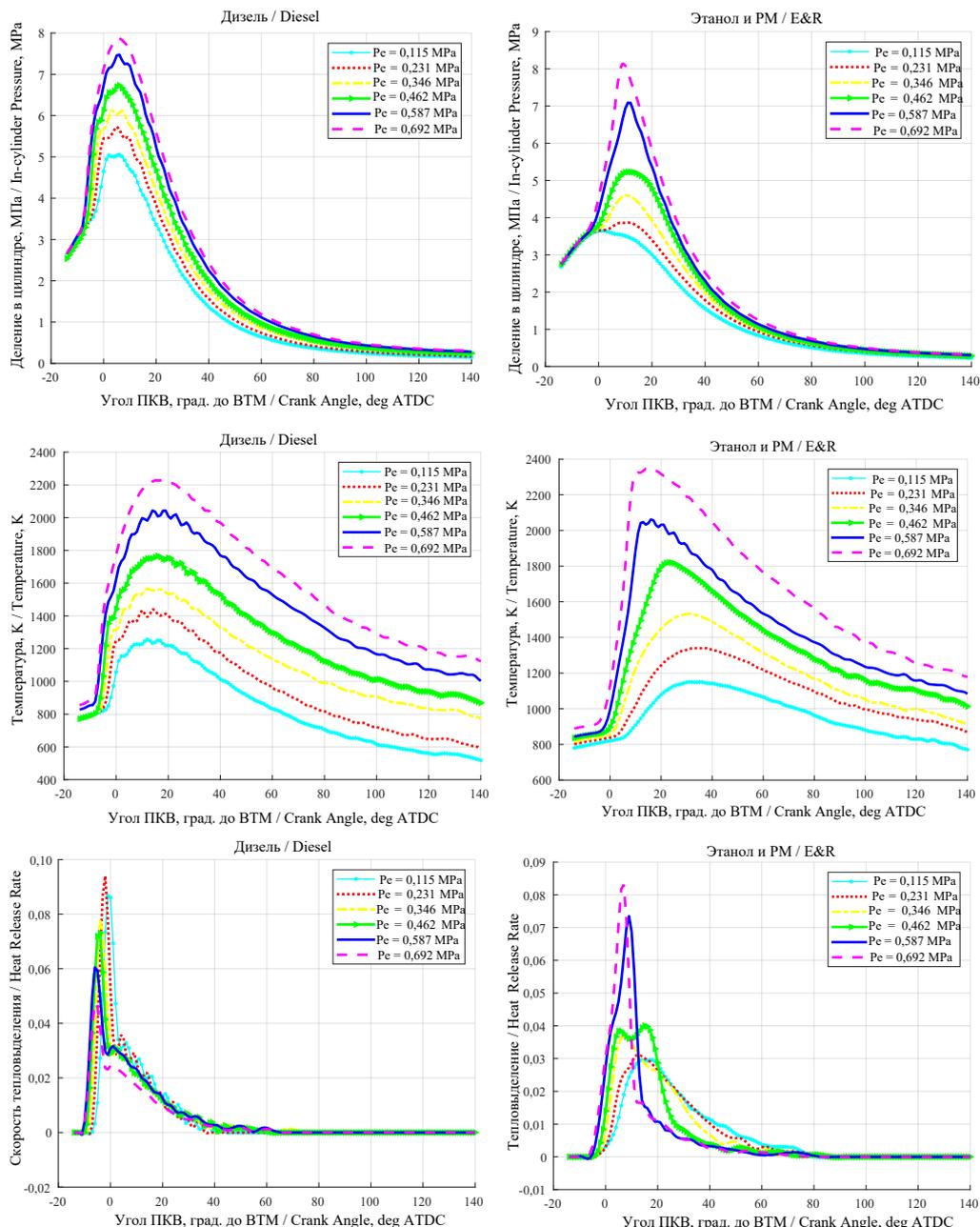
При росте нагрузки выше номинальной точки повышается эффективность

применения альтернативных топлив. Однако максимальный эффективный КПД при работе двигателя на этиловом спирте и РМ все же ниже, чем при работе на ДТ, и составляет 0,33 (рис. 4).

Процесс сгорания при использовании этанола с запальным РМ существенно изменяется (рис. 5). Здесь оказывают влияние значительные расхождения физических свойств топлива, вязкости, цетанового числа, теплоты сгорания и испарения. Об этом уже говорилось выше.



Р и с. 4. Показатели эффективности работы дизеля на различных топливах  
F i g. 4. Diesel performance indicators for various fuels



Р и с. 5. Характеристики внутрицилиндровых процессов, индикаторное давление, осредненная температура рабочего тела и скорость тепловыделения при работе дизеля на альтернативных и традиционном топливах

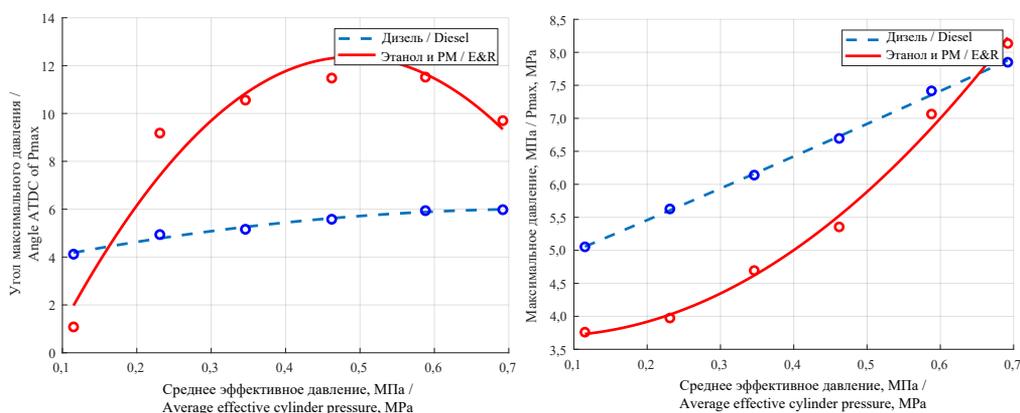
Fig. 5. Characteristics of processes inside the cylinder, indicator pressure, average temperature of the working fluid and the rate of heat release during diesel operation on alternative and traditional fuels

Главным образом изменяется характер тепловыделения, что отражается на функции осредненной температуры рабочего тела и давления газов в цилиндре от угла ПКВ дизеля. При условии обеспечения неизменяемого УУОВТ работа дизеля на ДТ носит более постоянный характер на всем диапазоне нагрузок с ярко выраженным двухстадийным характером протекания и четкой границей диффузионного и кинетического сгорания. Одновременный впрыск двух различных по физическим свойствам топлив в разном соотношении модифицирует кривую тепловыделения и размывает границу раздела между кинетической и диффузионной областью горения. Если с увеличением цикловой подачи этанола доля тепла от кинетического сгорания возрастает, то для дизельного процесса характерна обратная тенденция – увеличение доли диффузионного сгорания с ростом нагрузки. При этом на режиме максимальной нагрузки полное тепловыделение соответствует лишь 78 % потребленного топлива. Этанол и рапсовое мало на этих нагрузках полностью сгорают в цилиндре.

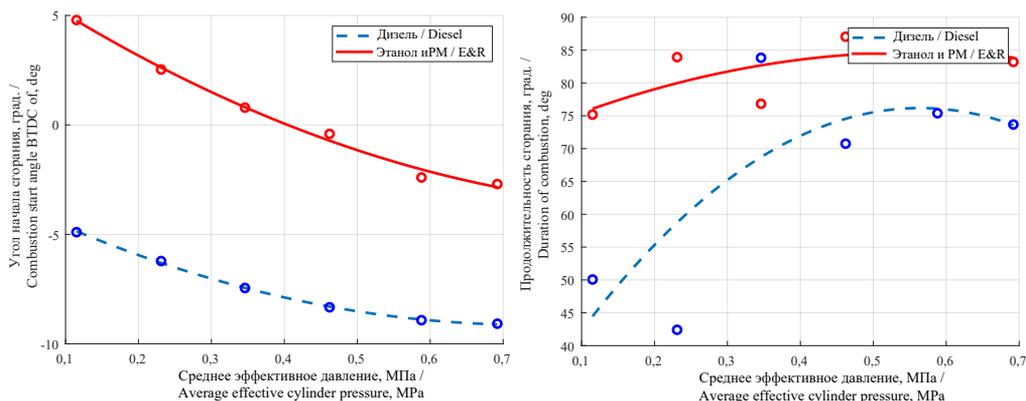
Несмотря на рост УУОВТ на 4 градуса ПКВ, максимальное давление газов в цилиндре достигается на всем диапазоне нагрузок позже, чем на штатном двигателе (рис. 6). При этом максимальное давление газов в цилиндре ниже при всех нагрузках, кроме максимальной. На рисунке 7 показаны границы начала горения в цилиндре и общая продолжительность сгорания.

Если начало горения можно было четко определить по отрыву индикаторной диаграммы от кривой сжатия, то определение продолжительности горения имеет существенную погрешность. Тем не менее можно достоверно определить, что, несмотря на позднее начало сгорания, продолжительность сгорания при работе двигателя на этаноле и РМ увеличивается от 8 до 30 %.

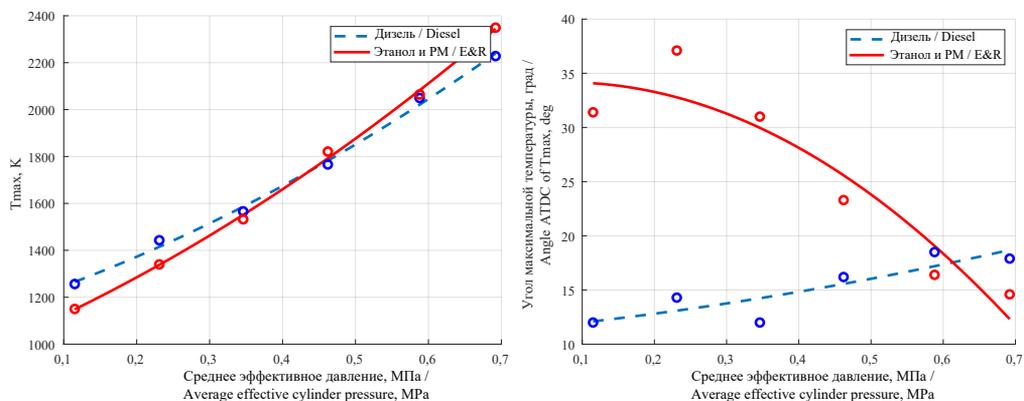
Угол достижения максимальной температуры газов в цилиндре при работе двигателя на этиловом спирте и РМ имеет максимальные значения при малых нагрузках и постепенно снижается с ростом температуры газов в цилиндре (рис. 8). На максимальные осредненные значения температуры газов в цилиндре вид применяемого



Р и с. 6. Максимальное давление газов в цилиндре и угол достижения пиковой точки  
 F i g. 6. Maximum gas pressure in the cylinder and the angle of reaching the peak point



Р и с. 7. Продолжительность и начало сгорания топлив в цилиндре двигателя  
 F i g. 7. Duration and start of fuel combustion in the engine cylinder



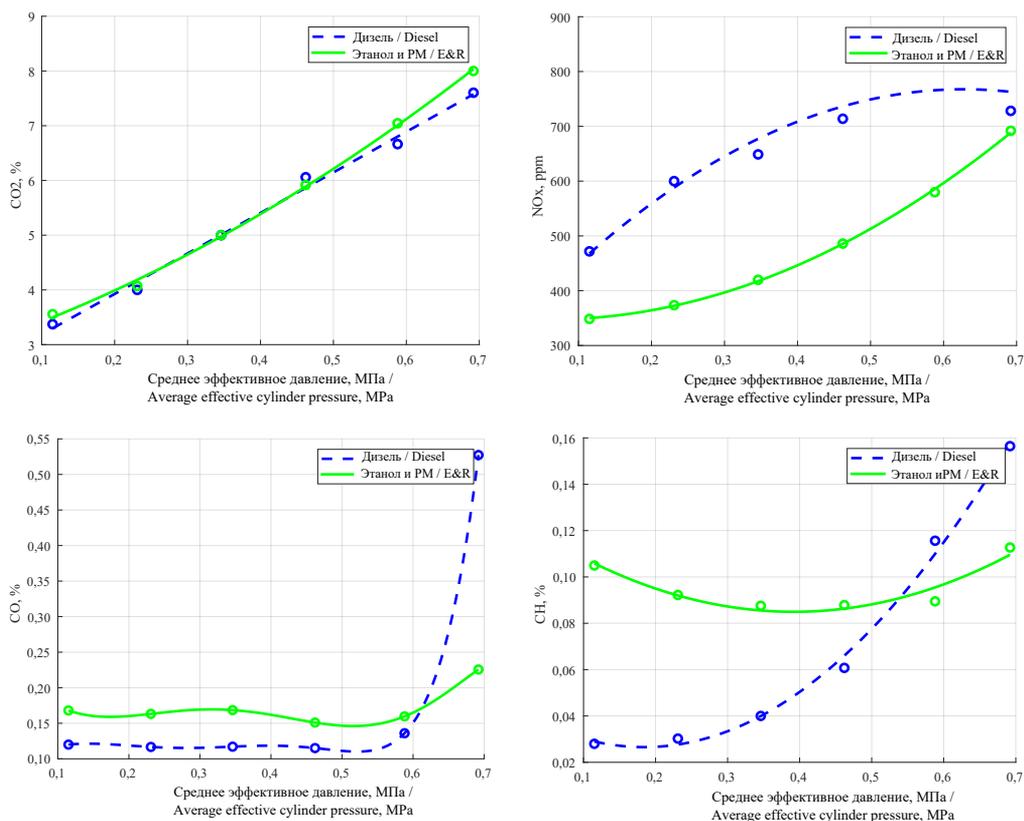
Р и с. 8. Значения максимальной осредненной температуры газов в цилиндре и угол максимальной температуры газов в цилиндре  
 F i g. 8. Values of the maximum averaged temperature of gases in the cylinder and the angle of the maximum temperature of gases in the cylinder

топлива не оказывает влияния, а качество процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре отражается на экологических показателях работы дизеля (рис. 9).

### Обсуждение и заключение

Учитывая рост потребления исчерпаемых энергоресурсов нефтегазовой отрасли и увеличение нагрузки на экосистему, а также опираясь на анализ литературных источников, можно сделать вывод, что среди существующего многообразия методов и способов снижения токсичности и дымности ОГ ДВС *Technologies, machinery and equipment*

с одновременной экономией нефтяного моторного топлива наиболее актуально применение в ДВС альтернативного топлива. В качестве альтернативного источника энергии обосновано применение этилового спирта и рапсового масла методом непосредственного впрыскивания в КС отдельными форсунками, что повышает надежность и скорость воспламенения топлива в цилиндре за счет пересечения факелов распыленного топлива. Рапсовое масло использовалось в качестве запального топлива, служащего в КС



Р и с. 9. Влияние применения этанола и РМ на экологические показатели работы дизеля в зависимости от изменения нагрузки

Fig. 9. The effect of the use of ethanol and rapeseed oil on the environmental performance of diesel depending on load changes

для воспламенения этилового спирта. Оптимизировав величину УУОВТ, мы получили приемлемую жесткость и высокую эффективность процессов сгорания и тепловыделения при минимальной токсичности ОГ.

Таким образом, на базе кафедры тепловых двигателей, автомобилей и тракторов в Вятском ГАТУ изучено влияние применения этанола в штатном тракторном дизеле с объемным смесеобразованием с организацией сгорания от факела запального рапсового масла. Также оптимизированы раздельные цикловые подачи для получения максимального энергетического и экологического эффекта.

В результате проведенного исследования авторы пришли к следующим выводам:

1. Применение этанола и запального РМ способно полностью заместить традиционное топливо нефтяного происхождения для действующего дизельного двигателя путем установки дополнительного топливного оборудования и модификации головки блока цилиндров для монтажа дополнительной форсунки.

2. Применение этанола и запального РМ позволяет повысить КПД работы двигателя на максимальных нагрузках и форсировать его за счет особенностей

процесса сгорания, а также повысить номинальную мощность.

3. Использование этанола и РМ позволяет существенно улучшить экологические показатели работы дизеля как на номинальном, так и на форсированных режимах и в разы снизить

дымность ОГ. При этом на треть снижаются выбросы оксидов азота и продукты неполного сгорания.

Для обеспечения эффективной и нетоксичной работы двигателя на этаноле и РМ на режимах малых нагрузок требуются дополнительные исследования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lung Function and Self-Rated Symptoms in Healthy Volunteers after Exposure to Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Exhaust with and without Particles [Электронный ресурс] / L. Green [et al.] // Particle and Fibre Toxicology. 2022. Vol. 19, Issue 9. doi: <https://doi.org/10.1186/s12989-021-00446-7>

2. Physicochemical and Cell Toxicity Properties of Particulate Matter (PM) from a Diesel Vehicle Failed with Diesel, Spent Coffee Ground Biodiesel, and Ethanol [Электронный ресурс] / P. K. Wong [et al.] // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 824. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153873>

3. Agarwal A. K., Kumar V., Ankur Kalwar A. J. Fuel Injection Strategy Optimisation and Experimental Performance and Emissions Evaluation of Diesel Displacement by Port Fuel Injected Methanol in a Retrofitted Mid-Size Genset Engine Prototype [Электронный ресурс] // Energy. 2022. Vol. 248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593>

4. Comparative Assessment of Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Tire Pyrolysis Oil-Diesel and Biodiesel-Diesel Blends in a Common-Rail Direct Injection Engine [Электронный ресурс] / Y. H. Teoh [et al.] // Fuel. 2022. Vol. 313. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123058>

5. Performance and Emissions of Neat Crude Palm Oil and Its Emulsions as Diesel Engine Fuel [Электронный ресурс] / A. F. E. Chan [et al.] // Environmental Progress and Sustainable Energy. 2022. Vol. 41, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.1002/ep.13749>

6. Impact of Compression Ratio on Combustion Behavior of Hydrogen Enriched Biogas-Diesel Operated CI Engine [Электронный ресурс] / P. Rosha [et al.] // Fuel. 2022. Vol. 310, Part B. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122321>

7. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Биотопливо или дымящие автомобили? // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 228–236. doi: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>

8. Оребаева А. А. Производство биоэтанола из возобновляемого сырья // Устойчивое развитие науки и образования. 2021. № 12. С. 18–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47936391> (дата обращения: 04.04.2022).

9. Experimental Investigation of High Alcohol Low Viscous Renewable Fuel in DI Diesel Engine / S. Wang [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28, Issue 10. P. 12026–12040. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08298-y>

10. Investigation of the Performances of a Diesel Engine Operating on Blended and Emulsified Bio-fuels from Rapeseed Oil [Электронный ресурс] / V. A. Markov [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14, Issue 20. doi: <https://doi.org/10.3390/en14206661>

11. Lopatin O. P. Investigation of Alternative Fuel Oxidation Kinetics in an Internal Combustion Engine [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062005>

12. Methanol as a Fuel for Internal Combustion Engines / S. Verhelst [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. 2019. Vol. 70. P. 43–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.10.001>

13. Pedrozo V. B., May I., Zhao H. Exploring the Mid-Load Potential of Ethanol-Diesel Dual-Fuel Combustion with and without EGR // Applied Energy. 2017. Vol. 193. P. 263–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.043>

14. Ethanol-Fueled Low Temperature Combustion: A Pathway to Clean and Efficient Diesel Engine Cycles / U. Asad [et al.] // Applied Energy. 2015. Vol. 157. P. 838–850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.057>

15. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Features of the Development of Fuel Flares When Running Diesel on Alcohol [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062004>
16. Experimental Investigation of Ethanol/Diesel Dual-Fuel Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine [Электронный ресурс] / J. Han [et al.] // Fuel. 2020. Vol. 275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>
17. Comparative Study on the Combustion and Emissions of Dual-Fuel Common Rail Engines Fueled with Diesel/Methanol, Diesel/Ethanol, and Diesel/N-Butanol [Электронный ресурс] / Z. Chen [et al.] // Fuel. 2021. Vol. 304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121360>
18. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Effective Indicators of Diesel Powered by Natural Gas and Alcohol-Fuel [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062028>
19. Asad U., Zheng M. Exhaust Gas Recirculation for Advanced Diesel Combustion Cycles // Applied Energy. 2014. Vol. 123. P. 242–252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.073>
20. Fuel Injection Strategies to Improve Emissions and Efficiency of High Compression Ratio Diesel Engines / U. Asad [et al.] // SAE Int. J. Engines. 2009. Vol. 1, Issue 1. P. 1220–1233. doi: <https://doi.org/10.4271/2008-01-2472>
21. Likhanov V. A., Lopatin O. P. Alcohol Biofuels for Internal Combustion Engine [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062041>
22. Фомин В. М., Хакимов Р. Р., Шевченко Д. В. Водород как химический реагент в кинетическом механизме образования углерода в дизеле // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 3. С. 10–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16533918> (дата обращения: 02.04.2022).
23. Low Temperature Autoignition of Diesel Fuel under Dual Operation with Hydrogen and Hydrogen-Carriers [Электронный ресурс] / J. J. Hernández [et al.] // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115516>
24. Effect of Ethanol on the Chemistry of Formation of Precursors of Polyaromatic Hydrocarbons in a Fuel-Rich Ethylene Flame at Atmospheric Pressure / I. E. Gerasimov [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2012. Vol. 48. P. 661–676. doi: <https://doi.org/10.1134/S0010508212060019>
25. Kurczyński D. Effect of the Rome Biodiesel on the Diesel Engine Fuel Consumption and Emission // Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. 2021. Vol. 23, Issue 4. P. 308–316. doi: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.4.B308-B316>
26. Numerical Study for the Spray Characteristics of Diesel Engine Powered by Biodiesel Fuels under Different Injection Pressures / M. F. Al-Dawody [et al.] // Journal of Engineering Research. 2022. Vol. 10, Issue 1B. P. 264–289. doi: <https://doi.org/10.36909/jer.9821>
27. Alcantara-Carmona A., López-Jiménez F. J., Dorado M. P. Compatibility Studies between an Indirect Injection Diesel Injector and Biodiesel with Different Composition: Stationary Tests [Электронный ресурс] // Fuel. 2022. Vol. 307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121788>
28. Influence of Non-Uniformity of Fuel Supply Parameters on Diesel Engine Performance [Электронный ресурс] / A. K. Arazehiv [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042063>
29. Xia M., Zhang F. Application of Multi-Parameter Fuzzy Optimization to Enhance Performance of a Regulated Two-Stage Turbocharged Diesel Engine Operating at High Altitude [Электронный ресурс] // Energies. 2020. Vol. 13, Issue 17. doi: <https://doi.org/10.3390/en13174278>
30. Operational Parameters of a Diesel Engine Running on Diesel-Rapeseed Oil-Methanol-Iso-Butanol Blends [Электронный ресурс] / J. Čedík [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14, Issue 19. doi: <https://doi.org/10.3390/en14196173>
31. Labeckas G., Slavinskas S. Comparative Evaluation of the Combustion Process and Emissions of a Diesel Engine Operating on the Cetane Improver 2-Ethylhexyl Nitrate Doped Rapeseed Oil and Aviation JP-8 Fuel [Электронный ресурс] // Energy Conversion and Management: X. 2021. Vol. 11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100106>

32. A Comparative Analysis of Emissions from a Compression-Ignition Engine Powered by Diesel, Rapeseed Biodiesel, and Biodiesel from *Chlorella Protothecoides* Biomass Cultured under Different Conditions [Электронный ресурс] / M. Dębowski [et al.] // Atmosphere. 2021. Vol. 12, Issue 9. doi: <https://doi.org/10.3390/ATMOS12091099>

33. Rayapureddy S. M., Matijošius J., Rimkus A. Comparison of Research Data of Diesel–Biodiesel–Isopropanol and Diesel–Rapeseed Oil–Isopropanol Fuel Blends Mixed at Different Proportions on a CI Engine [Электронный ресурс] // Sustainability. 2021. Vol. 13, Issue 18. doi: <https://doi.org/10.3390/su131810059>

34. Likhonov V. A., Lopatin O. P. Development of Environmentally Friendly Alcohol-Fuel Emulsions for Diesel Engines // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1515. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042019>

*Поступила 05.04.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 01.06.2022*

*Об авторах:*

**Лиханов Виталий Анатольевич**, заведующий кафедрой тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: [AGN-7347-2022](https://orcid.org/AGN-7347-2022), [lihanov.va@mail.ru](mailto:lihanov.va@mail.ru)

**Лопатин Олег Петрович**, профессор кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: [AAD-8374-2019](https://orcid.org/AAD-8374-2019), [nirs\\_vsaa@mail.ru](mailto:nirs_vsaa@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

В. А. Лиханов – научное руководство, анализ и доработка текста.

О. П. Лопатин – формирование структуры статьи, анализ литературных данных, описание методов и способов снижения дымности, редактирование текста, составление выводов и заключения.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Green L., Dierschke K., Mattsson F., et al. Lung Function and Self-Rated Symptoms in Healthy Volunteers after Exposure to Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Exhaust with and without Particles. *Particle and Fibre Toxicology*. 2022;19(9). doi: <https://doi.org/10.1186/s12989-021-00446-7>

2. Wong P.K., Ghadikolaei M.A., Chen S.H., et al. Physicochemical and Cell Toxicity Properties of Particulate Matter (PM) from a Diesel Vehicle Failed with Diesel, Spent Coffee Ground Biodiesel, and Ethanol. *Science of the Total Environment*. 2022;824. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153873>

3. Agarwal A.K., Kumar V., Ankur Kalwar A.J. Fuel Injection Strategy Optimisation and Experimental Performance and Emissions Evaluation of Diesel Displacement by Port Fuel Injected Methanol in a Retrofitted Mid-Size Genset Engine Prototype. *Energy*. 2022;248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593>

4. Teoh Y.H., Yaqoob H., How G., et al. Comparative Assessment of Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Tire Pyrolysis Oil-Diesel and Biodiesel-Diesel Blends in a Common-Rail Direct Injection Engine. *Fuel*. 2022;313. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123058>

5. Chan A.F.E., Yahya W.J., Kadir H.A., et al. Performance and Emissions of Neat Crude Palm Oil and Its Emulsions as Diesel Engine Fuel. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 2022;41(2). doi: <https://doi.org/10.1002/ep.13749>

6. Roshia P., Kumar S., Kumar P.S., et al. Impact of Compression Ratio on Combustion Behavior of Hydrogen Enriched Biogas-Diesel Operated CI Engine. *Fuel*. 2022;310-B. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122321>

7. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Biofuels or Smoking Cars? *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;(3):228–236. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-228-236>
8. Orebayeva A.A. Bioethanol Production from Renewable Raw Materials. *Ustoychivoye razvitiye nauki i obrazovaniya*. 2021;(12):18–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47936391> (accessed 04.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Wang S., Viswanathan K., Esakkimuthu S., Azad K. Experimental Investigation of High Alcohol Low Viscous Renewable Fuel in DI Diesel Engine. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(10):12026–12040. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08298-y>
10. Markov V.A., Sa B., Devyanin S.N., et al. Investigation of the Performances of a Diesel Engine Operating on Blended and Emulsified Biofuels from Rapeseed Oil. *Energies*. 2021;14(20). doi: <https://doi.org/10.3390/en14206661>
11. Lopatin O.P. Investigation of Alternative Fuel Oxidation Kinetics in an Internal Combustion Engine. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062005>
12. Verhelst S., Turner J., Sileghem L., Vancoillie J. Methanol as a Fuel for Internal Combustion Engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019;70:43–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.10.001>
13. Pedrozo V.B., May I., Zhao H. Exploring the Mid-Load Potential of Ethanol-Diesel Dual-Fuel Combustion with and without EGR. *Applied Energy*. 2017;193:263–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.043>
14. Asad U., Kumar R., Zheng M., Tjong J. Ethanol-Fueled Low Temperature Combustion: A Pathway to Clean and Efficient Diesel Engine Cycles. *Applied Energy*. 2015;157:838–850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.057>
15. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Features of the Development of Fuel Flares When Running Diesel on Alcohol. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 919. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062004>
16. Han J., Somers L.M.T., Cracknell R., et al. Experimental Investigation of Ethanol/Diesel Dual-Fuel Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine. *Fuel*. 2020;275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>
17. Chen Z., He J., Chen H., et al. Comparative Study on the Combustion and Emissions of Dual-Fuel Common Rail Engines Fueled with Diesel/Methanol, Diesel/Ethanol, and Diesel/N-Butanol. *Fuel*. 2021;304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121360>
18. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Effective Indicators of Diesel Powered by Natural Gas and Alcohol-Fuel. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062028>
19. Asad U., Zheng M. Exhaust Gas Recirculation for Advanced Diesel Combustion Cycles. *Applied Energy*. 2014;123:242–252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.073>
20. Asad U., Zheng M., Han X., et al. Fuel Injection Strategies to Improve Emissions and Efficiency of High Compression Ratio Diesel Engines. *SAE Int. J. Engines*. 2009;1(1):1220–1233. doi: <https://doi.org/10.4271/2008-01-2472>
21. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Alcohol Biofuels for Internal Combustion Engine. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 548. 2020. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062041>
22. Fomin V.M., Khakimov R.R., Shevchenko D.V. About a Role of Hydrogen as Chemical Reagent in the Kinetic Mechanism of Formation of Carbon in a Diesel Engine. *Transport na alternativnom toplive*. 2011;(3):10–13. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16533918> (accessed 02.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Hernández J.J., Cova-Bonillo A., Wu H., et al. Low Temperature Autoignition of Diesel Fuel under Dual Operation with Hydrogen and Hydrogen-Carriers. *Energy Conversion and Management*. 2022;258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115516>
24. Gerasimov I.E., Knyazkov D.A., Yakimov S.A., et al. Effect of Ethanol on the Chemistry of Formation of Precursors of Polyaromatic Hydrocarbons in a Fuel-Rich Ethylene Flame at Atmospheric

Pressure. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2012;48:661–676. doi: <https://doi.org/10.1134/S0010508212060019>

25. Kurczyński D. Effect of the Rome Biodiesel on the Diesel Engine Fuel Consumption and Emission. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2021;23(4):308–316. doi: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.4.B308-B316>

26. Al-Dawody M.F., Al-Farhany K., Hamza N.H., Hamza D.A. Numerical Study for the Spray Characteristics of Diesel Engine Powered by Biodiesel Fuels under Different Injection Pressures. *Journal of Engineering Research*. 2022;10(1B):264–289. doi: <https://doi.org/10.36909/jer.9821>

27. Alcantara-Carmona A., López-Jiménez F.J., Dorado M.P. Compatibility Studies between an Indirect Injection Diesel Injector and Biodiesel with Different Composition: Stationary Tests. *Fuel*. 2022;307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121788>

28. Apazehiv A.K., Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I., Shekikhacheva L.Z. Influence of Non-Uniformity of Fuel Supply Parameters on Diesel Engine Performance. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042063>

29. Xia M., Zhang F. Application of Multi-Parameter Fuzzy Optimization to Enhance Performance of a Regulated Two-Stage Turbocharged Diesel Engine Operating at High Altitude. *Energies*. 2020;13(17). doi: <https://doi.org/10.3390/en13174278>

30. Čedík J., Pexa M., Holúbek M., et al. Operational Parameters of a Diesel Engine Running on Diesel-Rapeseed Oil-Methanol-Iso-Butanol Blends. *Energies*. 2021;14(19). doi: <https://doi.org/10.3390/en14196173>

31. Labeckas G., Slavinskas S. Comparative Evaluation of the Combustion Process and Emissions of a Diesel Engine Operating on the Cetane Improver 2-Ethylhexyl Nitrate Doped Rapeseed Oil and Aviation JP-8 Fuel. *Energy Conversion and Management: X*. 2021;11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100106>

32. Dębowski M., Michalski R., Zieliński M., Kazimierowicz J. A Comparative Analysis of Emissions from a Compression-Ignition Engine Powered by Diesel, Rapeseed Biodiesel, and Biodiesel from *Chlorella Protothecoides* Biomass Cultured under Different Conditions. *Atmosphere*. 2021;12(9). doi: <https://doi.org/10.3390/ATMOS12091099>

33. Rayapureddy S.M., Matijošius J., Rimkus A. Comparison of Research Data of Diesel–Biodiesel–Isopropanol and Diesel–Rapeseed Oil–Isopropanol Fuel Blends Mixed at Different Proportions on a CI Engine. *Sustainability*. 2021;13(18). doi: <https://doi.org/10.3390/su131810059>

34. Likhonov V.A., Lopatin O.P. Development of Environmentally Friendly Alcohol-Fuel Emulsions for Diesel Engines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042019>

*Submitted 05.04.2022; approved after reviewing 16.05.2022; accepted for publication 01.06.2022*

#### *About the authors:*

**Vitaly A. Likhonov**, Head of the Chair of Thermal Engines of Automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: AGN-7347-2022, [lihanov.va@mail.ru](mailto:lihanov.va@mail.ru)

**Oleg P. Lopatin**, Professor of the Chair of Thermal Engines of Automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, [nirs\\_vsaa@mail.ru](mailto:nirs_vsaa@mail.ru)

#### *Contribution of the authors:*

V. A. Likhonov – scientific guidance, analysis and revision of the text.

O. P. Lopatin – formation of the structure of the article, analysis of literary data, description of methods and ways to reduce smoke, text editing, drawing conclusions and conclusions.

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



## Оценка природных растительных сообществ с использованием данных дистанционного зондирования Земли в условиях степей Ставропольского края

Ф. В. Ерошенко , Н. Г. Лапенко, И. Г. Сторчак,  
Е. А. Бильдиева, Р. Д. Костицын, М. А. Старостина  
Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр  
(г. Михайловск, Российская Федерация)

 [yer-sniish@mail.ru](mailto:yer-sniish@mail.ru)

### Аннотация

*Введение.* Актуальность исследования степных фитоценозов обусловлена неудовлетворительным состоянием природных травостоев: низким биоразнообразием и высокой степенью деградации. Цель работы – установить особенности связи данных дистанционного зондирования Земли с состоянием и степенью деградации естественных травостоев в различных почвенно-климатических зонах Ставропольского края. Данные дистанционного зондирования Земли с определенными временными и пространственными разрешениями позволяют осуществлять практически непрерывный мониторинг состояния природных травостоев.

*Материалы и методы.* Изучение степных фитоценозов осуществлялось в 2016–2020 гг. наземно на учетных площадках (100 м<sup>2</sup>) согласно требованиям методик, общепринятых в фитоценологии. Оценка состояния растительности производилась с использованием данных дистанционного зондирования Земли по значениям нормализованного относительного вегетационного индекса. По данным спутника построены картограммы нормализованного относительного вегетационного индекса для каждого пункта исследования.

*Результаты исследования.* Из числа объектов исследования, расположенных в зоне неустойчивого увлажнения, доля полигонов с сильной степенью деградации составляет 18,8 %, со средней степенью деградации 37,5 %, а в засушливой зоне 70,6 и 23,5 % соответственно. В зоне неустойчивого увлажнения наиболее высокие коэффициенты ранговой корреляции между степенью деградации и площадью, занимаемой травянистой растительностью с определенным значением вегетационного индекса, наблюдаются в случае с нормализованным относительным вегетационным индексом, находящимся в пределах 0,0–0,4, а в засушливой 0,0–0,3 (при уровне значимости 0,01).

*Обсуждение и заключение.* При использовании данных дистанционного зондирования Земли для оценки степени деградации степных экосистем Ставропольского края необходимо использовать специфические для различных почвенно-климатических условий регрессионные модели.

**Ключевые слова:** биоразнообразие, вегетационный индекс, деградация, дистанционное зондирование Земли, засушливая зона, картограмма, растительные сообщества

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



*Для цитирования:* Оценка природных растительных сообществ с использованием данных дистанционного зондирования Земли в условиях степей Ставропольского края / Ф. В. Ерошенко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 390–409. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.390-409>

Original article

## Assessment of Natural Plant Communities through the Use of Remote Sensing Data of the Stavropol Territory Steppes

F. V. Eroshenko<sup>✉</sup>, N. G. Lapenko, I. G. Storchak,  
E. A. Bildieva, R. D. Kostitsyn, M. A. Starostina  
*North Caucasus Federal Agricultural Research Centre  
(Mikhailovsk, Russian Federation)*

<sup>✉</sup> [yer-sniish@mail.ru](mailto:yer-sniish@mail.ru)

### Abstract

*Introduction.* The relevance of the study of steppe phytocenoses is caused by the unsatisfactory state of natural grass stands, namely a low level of biodiversity and a high degree of degradation. The aim of the work is to determine the features of the connection of the Earth remote sensing data with the state and degree of degradation of natural grass stands in unstable moistening zone and arid zone of the Stavropol Territory. The Earth remote sensing data with certain temporal and spatial resolutions make it possible to carry out almost continuous monitoring of the state of natural grass stands.

*Materials and Methods.* The study of steppe phytocenoses was carried out in 2016–2020 on the ground at discount areas (100 m<sup>2</sup>) according to the requirements of methods generally accepted in phytocenology. Vegetation condition was assessed using the Earth remote sensing data based on the values of the Normalized Difference Vegetation Index. According to the satellite data, Normalized Difference Vegetation Index cartograms were constructed for each point of the study.

*Results.* The proportion of polygons with a high degree of degradation is 18.8% of research objects located in the zone of unstable moistening and the proportion of polygons with an average degree of degradation is 37.5%, while in the arid zone 70.6 and 23.5%, respectively. In the zone of unstable moistening, the highest coefficients of rank correlation between the degradation degree and the area occupied by herbaceous vegetation with a certain value of the vegetation index are observed in the case if Normalized Difference Vegetation Index is in the range of 0.0–0.4, and in the arid zone 0.0–0.3 (at 0.01 significance level).

*Discussion and Conclusion.* When using the Earth remote sensing data to assess the degree of degradation of steppe ecosystems of the Stavropol Territory, it is necessary to use regression models specific to various soil and climatic conditions.

**Keywords:** biodiversity, vegetation index, degradation, remote sensing data, arid zone, cartogram, plant communities

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

**For citation:** Eroshenko F.V., Lapenko N.G., Storchak I.G., et al. Assessment of Natural Plant Communities through the Use of Remote Sensing Data of the Stavropol Territory Steppes. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):390–409. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.390-409>

### Введение

Проблема сохранения степных экосистем является актуальной из-за их высокой экологической, природоохран-

ной и экономической значимости [1]. Методы, традиционно используемые для оценки состояния степных фитоценозов, трудоемки, ресурсозатратны,

что особенно важно в современных экономических условиях, и не всегда отличаются высокой точностью. В связи с этим возникает вопрос о поиске новых методов мониторинга, которые позволят оперативно и объективно контролировать состояния степных растительных сообществ [2; 3]. Такие методы могут быть разработаны на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые уже достаточно широко используют в сельском хозяйстве для изучения лесных агроландшафтов, включая естественные сенокосы и пастбища [4–8].

Цель исследования – установить особенности связи данных ДЗЗ с состоянием и степенью деградации естественных травостоев в различных почвенно-климатических зонах Ставропольского края.

### **Обзор литературы**

Современная степная экосистема – это природная совокупность живых и косных компонентов, сформированная при абсолютном господстве травяных форм растений с участием кустарничков и полукустарничков [9; 10]. В последние десятилетия коренная перестройка хозяйственных механизмов в Российской Федерации повлекла за собой изменение режимов эксплуатации природных экосистем, в частности сенокосных и пастбищных фитоценозов [11]. На современном этапе степи испытывают сильный антропогенный пресс, так как нередко рассматриваются сельхозпроизводителями только с экономической точки зрения как кормовая база для животноводства [12; 13]. В результате их биологическое разнообразие, представленное видами злаковых, бобовых, группой разнотравья, постоянно находится в режиме хозяйственного использования, что приводит к утрате этого разнообразия [14; 15].

На природные экосистемы влияют абиотические факторы, такие как

засухи, суховеи, ливневые осадки, что в целом сказывается на состоянии природных экосистем и нередко приводит к деградации их растительного покрова. Вместе с тем ресурсы природных травостоев не безграничны. И здесь возникает вопрос о текущем состоянии природных фитоценозов [16; 17].

Анализ научных публикаций позволяет сделать вывод, что вопрос современного состояния степей актуален не только для Ставропольского края, но и практически для всех степных регионов нашей страны. Так, по данным ученых Института степи ОФИЦ УрО РАН, традиционные технологии, применяемые в Оренбургской области на протяжении длительного времени и ориентированные преимущественно на мобилизацию природного почвенного плодородия, привели к повсеместной деградации степных угодий, иссушению территории, снижению продуктивности агроценозов и кризисному сокращению ландшафтного и биологического разнообразия [18].

Исследования по проблеме деградации почв сухой степи в долине Маныч, проведенные на базе научно-экспедиционного стационара «Маныч» ЮНЦ РАН в Ростовской области, выявили, что усиление аридизации климата и антропогенной нагрузки в сухой степи привели к засолению, опустыниванию, пастбищной дигрессии. На исследованной территории площадь среднедеградированных почв составляет 40 %, сильно- и очень сильнодеградированных 32 %, слабодеградированных 18 %, а целинных (ненарушенных) только 10 % [19].

Исследования криоаридных почв Самахинской степи Юго-Восточного Алтая, широко используемых местным населением как пастбищные угодья и в орошаемой земледелии, также позволили выявить признаки деградации, обусловленные нерациональным

землепользованием и наложенными процессами трансформации экосистем под влиянием аридизации климата. На пастбищных землях, подверженных чрезмерному выпасу скота, отмечено разрушение дернины и структурных элементов [20; 21].

В результате многолетних исследований ландшафтов бассейна озера Байкал были прослежены основные закономерности современного антропогенного воздействия на разные типы экосистем на территории российской и монгольской частей. Антропогенная динамика пастбищных экосистем на территории монгольской части бассейна отличается прогрессирующим развитием пастбищной дигрессии, охватывающей все большие площади. Здесь резко увеличилась доля полностью трансформированных пастбищ, на месте которых формируются монодоминантные растительные сообщества из инвазийных видов. На данный момент наиболее широко распространены средне- и сильнонарушенные пастбища, на которых коренная степная растительность уже заменена менее продуктивными сообществами с преобладанием сорных и непоедаемых видов [22; 23].

Широкое использование дистанционных (аэрокосмических) методов значительно увеличило возможности изучения и оценки природных ресурсов. Повысилось качество исследований, оперативность и объективность полученных результатов, сократились временные и финансовые затраты [24]. В настоящее время данные ДЗЗ используют для оценки состояния и продуктивности сельскохозяйственных культур [25]. Космоснимки в различных спектрах электромагнитных волн дают возможность рассчитывать

вегетационные индексы, которые зависят от оптических свойств растительности. Наиболее часто используется нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) [26; 27]. Этот индекс применяют и при анализе состояния естественных травостоев [28; 29]. В то же время отмечается, что условия выращивания оказывают существенное влияние не только на состояние растений, но и на динамику NDVI [30; 31]. Следовательно, закономерности связи ДЗЗ с состоянием растений, выявленные в одних почвенно-климатических условиях, могут иметь свои особенности в других.

### Материалы и методы

Объекты исследования – природные, растительные сообщества, расположенные, согласно геоботаническому районированию территории Ставропольского края, в зоне неустойчивого увлажнения и в засушливой зоне (рис. 1).

В засушливой зоне гидротермический коэффициент (ГТК) равен 0,63–0,72, среднегодовое количество осадков 384–429 мм. Почвенный покров представлен светло-каштановыми почвами, встречаются так же каштановые, темно-каштановые и лугово-каштановые почвы. В зоне неустойчивого увлажнения климат умеренно континентальный с ГТК = 0,9–1,1, среднегодовое количество осадков 450–550 мм. Территориально зона неустойчивого увлажнения относится к Предкавказской почвенной провинции, представленной преимущественно почвами черноземного типа<sup>1</sup>.

Изучение степных ценозов осуществлялось в 2016–2020 гг. на учетных площадках (100 м<sup>2</sup>) согласно требованиям методик, общепринятых в фитоценологии<sup>2</sup> [32].

<sup>1</sup> Система земледелия нового поколения Ставропольского края / В. В. Кулинцев [и др.]. Ставрополь : АГРУС, 2013. 520 с.

<sup>2</sup> Методика изучения сенокосов и пастбищ / под ред. Н. С. Конюшкова, Т. А. Работнова, И. А. Цаценкина. М. : Сельхозиздат, 1972. 288 с.

Для выявления связи степени деградации естественных травостоев с данными ДЗЗ были использованы результаты анализа снимков сенсора MODIS (пространственное разрешение 230 м, ежедневная периодичность), полученных с сервиса «ВЕГА-Science» ИКИ РАН. Также были применены высокодетальные изображения сенсора MSI спутников Sentinel-2A/2B (пространственное разрешение 10 м, периодичность 2–5 дней). Анализ связи данных ДЗЗ с состоянием травостоев на выбранных полигонах заключался в определении ранговой корреляции между ДЗЗ и степенью деградации естественных кормовых угодий (для этих целей использовали данные спутников Sentinel-2A/2B).

#### Результаты исследования

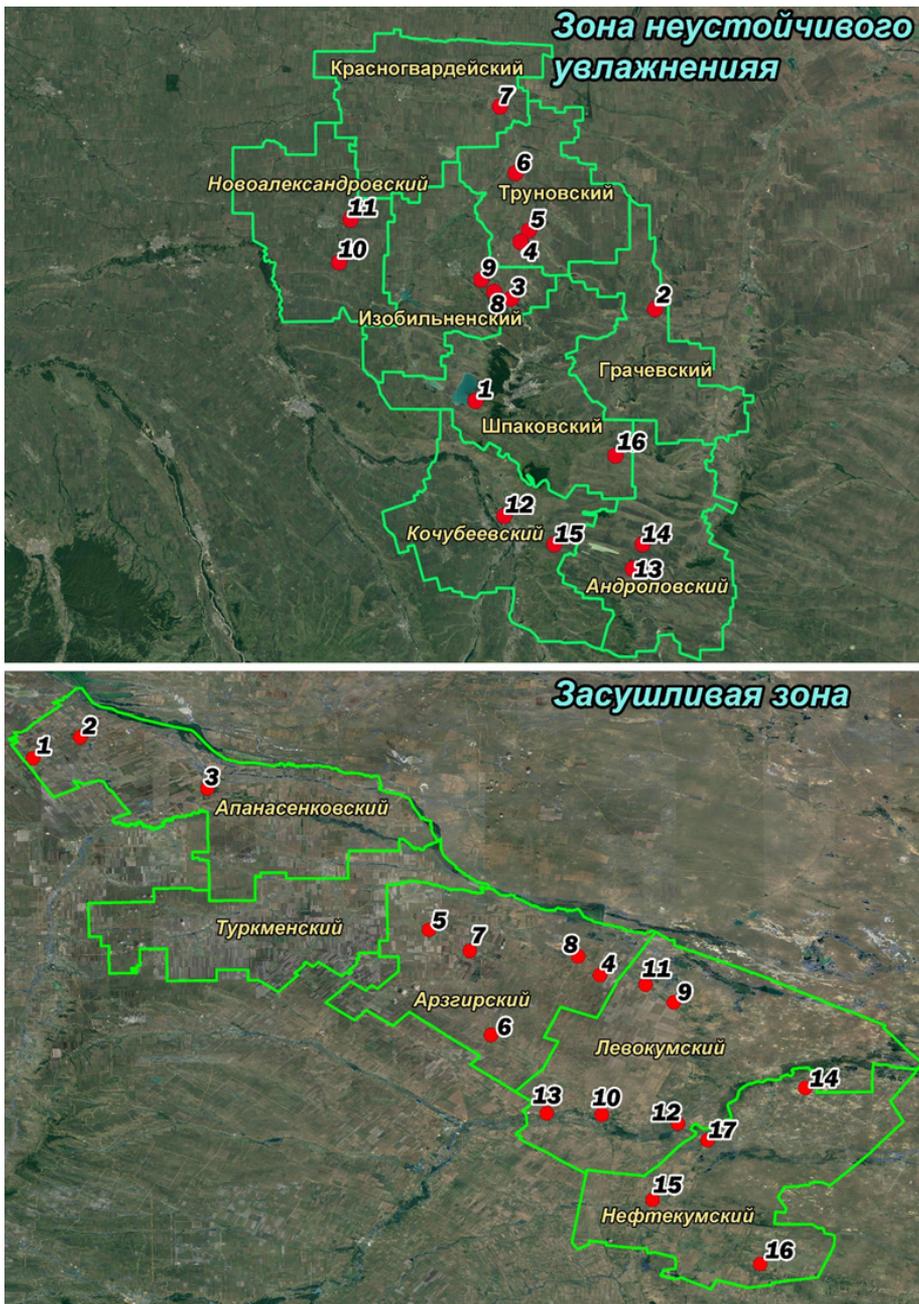
Результаты геоботанического обследования крайне засушливых степных сообществ восточной части Ставропольского края, представленные в таблице 1, позволяют охарактеризовать степные фитоценозы как травостой с преобладанием полынно-разнотравных модификаций. Растительность степных фитоценозов по количеству растений колеблется от 10 до 35 видов на учетной площади (10x10 м). Много малолетников, в отдельных пунктах до 50–60 %. Травостой наполовину и выше состоит из сорных видов, таких как молочай Сеггера (*Euphorbia seguieriana*), полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), синеголовник полевой (*Eryngium campestre*), тысячелистник Биберштейна (*Achillea biebersteinii*) и др. Практически отсутствуют ценные кормовые виды дикорастущей флоры: келерия стройная (*Koeleria cristata*), виды житняка (*Agropyron*), ковыля (*Stipa*).

Результаты изучения природных травянистых сообществ зоны неустойчивого увлажнения приведены в таблице 2. Растительность зоны неустойчивого увлажнения по биоразнообразию

флоры разнородна, ее количество колеблется от 10 до 45 видов на учетной площади. Анализ полевого материала позволил выявить различные типы и модификации растительности, сформировавшиеся под влиянием сенокосения и выпаса животных. Они имеют различную степень интенсивности: от слабодеградированных с доминирующими в травостое многолетними видами злаковых и бобовых до сильно деградируемых, растительный покров которых характеризуется отсутствием ценных кормовых растений. Их сменила сорная растительность. Данные, более подробно представленные в таблице 2, описаны в ранее опубликованной статье [33].

Почвенно-климатические условия оказывают большое влияние на рост и развитие растений. В следствие этого динамика NDVI травяной растительности в различных природных зонах Ставропольского края характеризуется своими особенностями. Об этом свидетельствуют графики изменений вегетационного индекса в течение вегетации в засушливой зоне и в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края. Используются данные Сервиса «ВЕГА» ИКИ РАН сенсора MODIS для районов, в которых проводили исследования. Зона неустойчивого увлажнения: Труновский, Грачевский, Изобильненский, Красногвардейский, Новоалександровский, Кочубеевский, Шпаковский и Андроповский районы. Засушливая зона: Левокумский и Нефтекумский (рис. 2).

Проведенный анализ показал, что в зоне неустойчивого увлажнения максимум NDVI приходится на 21 мая, а в засушливой – на 23 апреля. Кроме того, значение максимума в первой зоне на 37,4 % больше, чем во второй (0,7056 и 0,5135 соответственно). В среднем с мая по ноябрь вегетационный индекс в зоне неустойчивого увлажнения на 46,8 % больше, чем в засушливой зоне.



Р и с. 1. Расположение объектов исследований

F i g. 1. Location of research objects

Таблица 1  
Table 1

**Особенности степных фитоценозов засушливой зоны Ставропольского края**  
**Features of steppe phytocenoses of the Stavropol Territory arid zone**

| Номер полигона / Polygon number | Район / District                  | Пункты / Points                   | Количество видов растений на 100 м <sup>2</sup> / Number of plant species per 100 m <sup>2</sup> | Площадь покрытия почвы надземными частями растений, % / Area of soil coverage by aboveground parts of plants, % | Тип, модификация / Type, modification                               | Степень деградации естественных кормовых угодий / Degree of degradation of natural forage lands |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|
| 1                               | 2                                 | 3                                 | 4  | 5   | 6   | 7   |
| 1                               | Апанасенковский / Апанасенковскій | Малая Джалга / Malaya Dzhalgа     | 12   | 30  | полянно-разнотравная / wormwood-mixed grass                         | III   |
| 2                               |                                   | Клевка / Кіевка                   | 18   | 30  | полянно-разнотравная / wormwood-mixed grass                         | III   |
| 3                               | Апанасенковский / Апанасенковскій | Дивное / Дівне                    | 16   | 60  | полянно-мятликово-костровые / wormwood-bluegrass-meadow brome       | III   |
| 4                               |                                   | Садовое / Садове                  | 23   | 100   | ковыльно-типчаково-разнотравная / feather grass-tірchak-mixed grass | II  |
| 5                               | Арзгирский / Arzgirskiy           | Родниковское / Rodnikovskoe       | 32   | 80  | ковыльно-типчаковая / feather grass-tірchak                         | I   |
| 6                               |                                   | Петропавловское / Петропавловське | 16   | 40  | мятликово-разнотравная / bluegrass-mixed grass                      | III   |
| 7                               | Арзгирский / Arzgirskiy           | Арзгир / Arzgir                   | 20   | 70  | мятликово-полянная / bluegrass-wormwood                             | II  |
| 8                               |                                   | Чограйское / Chograyskoe          | 27   | 40  | полянно-осоково-разнотравная / wormwood-sedge-mixed grass           | III   |

Окончание таблицы 1 / End of table 1

| 1  | 2                              | 3                              | 4  | 5  | 6   | 7   |
|----|--------------------------------|--------------------------------|----|----|---|-----|
| 9  | Турксад / Turksad              | Турксад / Turksad              | 21 | 40 | полынно-тысячелистниковая / wormwood-yaugtow    | III |
| 10 | Левокумское / Levokumskoe      | Левокумское / Levokumskoe      | 31 | 60 | осоково-попынная / sedge-wormwood               | III |
| 11 | Приозерное / Priozeroye        | Приозерное / Priozeroye        | 10 | 30 | полынно-мятликовая / wormwood-bluegrass         | II  |
| 12 | Урожайное / Urozhaupoe         | Урожайное / Urozhaupoe         | 26 | 80 | полынно-разнотравная / wormwood-mixed grass     | III |
| 13 | Бургун-Маджары / Burgun-Majary | Бургун-Маджары / Burgun-Majary | 22 | 40 | житняково-разнотравная / wheatgrass-mixed grass | II  |
| 14 | Зимняя Ставка / Zimnya Stavka  | Зимняя Ставка / Zimnya Stavka  | 10 | 70 | мятликово-попынные / bluegrass-wormwood         | III |
| 15 | Ачикулак / Achikulak           | Ачикулак / Achikulak           | 20 | 30 | полынно-мятликовая / wormwood-bluegrass         | III |
| 16 | Тукуй-Мектеб / Tukui-Mekteb    | Тукуй-Мектеб / Tukui-Mekteb    | 35 | 80 | злаково-попынная / cereal-wormwood              | III |
| 17 | Нефтекумский / Neftekumskiy    | Нефтекумск / Neftekumsk        | 20 | 60 | полынно-разнотравная / wormwood-mixed grass     | III |

*Примечание.* Степень деградации: 0 – недеградированная; I – слабодеградированная; II – среднедеградированная; III – сильнодеградированная; IV – очень сильнодеградированные (разрушенные)<sup>3</sup>.

*Note.* Degree of degradation: 0 – undegraded; I – weakly degraded; II – medium degraded; III – highly degraded; IV – very much degraded (destroyed).

<sup>3</sup> Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. Письмо Роскомзема от 27.03.1995 г. №3-15/582. 23 с.

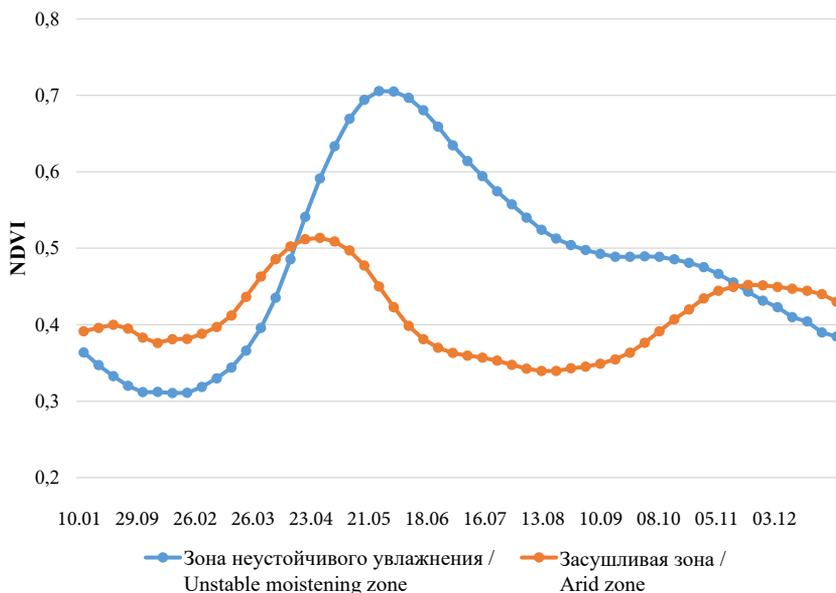
Таблица 2  
Table 2

**Особенности степных фитоценозов зоны неустойчивого увлажнения Ставропольского края**  
**Features of steppe phytocenoses of the unstable moistening zone in the Stavropol Territory**

| Номер полигона / Polygon number | Район / District                      | Пункты / Points               | Количество видов растений на 100 м <sup>2</sup> / Number of plant species per 100 m <sup>2</sup> | Площадь покрытия почвы надземными частями растений, % / Area of soil coverage by aboveground parts of plants, % | Тип, модификация / Type, modification                            | Степень деградации естественных кормовых угодий / Degree of degradation of natural forage lands |
|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--|---|--|---|
| 1                               | 2                                     | 3                             | 4  | 5   | 6  | 7   |
| 1                               | Шаповский / Shpakovskiy               | Сенгилеевское / Sengileyskoye | 45   | 100   | ковыльно-типчаково-разнотравная / feather-tipchak-mixed grass    | I   |
| 2                               | Грачевский / Grachevskiy              | Ямки / Yamki                  | 27   | 90  | бородачево-типчаково-разнотравная / bluestem-tipchak-mixed grass | II  |
| 3                               | Изобильненский / Izobilnenskiy        | Московское / Moskovskoye      | 28   | 80  | типчаково-разнотравная / tipchak-mixed grass                     | II  |
| 4                               |                                       | Донское / Donskoe             | 36   | 90  | бородачево-разнотравная / bluestem-mixed grass                   | II  |
| 5                               | Труновский / Trunovskiy               | Труновское / Trunovskoe       | 29   | 70  | бородачево-типчаково-разнотравная / bluestem-tipchak-mixed grass | I   |
| 6                               |                                       | Безопасное / Bezopasnoye      | 23   | 70  | полюнно-разнотравная / wormwood-mixed grass                      | III   |
| 7                               | Красногвардейский / Krasnogvardeyskiy | Дмитриевское / Dmitriyevskoye | 17   | 100   | полюнно-разнотравная / wormwood-mixed grass                      | III   |

Окончание таблицы 2 / End of table 2

| 1  | 2   | 3                                 | 4  | 5   | 6  | 7   |
|----|---|-----------------------------------|----|-----|--|-----|
| 8  | Изобильненский / Izobilnenskiy            | Старая Дорога / StaraYa Doroga    | 34 | 100 | ковыльно-разнотравная / feather-mixed grass                          | I   |
| 9  |   | Найденовка / Naydenovka           | 33 | 100 | бородачево-люцерново-разнотравная / bluestem-alfalfa-mixed grass     | I   |
| 10 | Новоалександровский / Novoaleksandrovskiy | Кармалиновское / Kartmalinovskoye | 26 | 100 | пырейно-разнотравная / wheatgrass-mixed grass                        | II  |
| 11 |   | Виноградное / Vinogradnoye        | 25 | 100 | бородачево-келериево-разнотравная / bluestem-koelegria-mixed grass   | II  |
| 12 | Кочубеевский / Kochubeyskiy               | Невинномыск / Nevinnomyssk        | 10 | 100 | люцерново-типчаково-разнотравная / alfalfa-tirchak-mixed grass       | I   |
| 13 | Андроповский / Andropovskiy               | Водораздел / Vodorazdel           | 11 | 70  | типчаково-разнотравная / tirchak-mixed grass                         | II  |
| 14 |   | Кланкыз / Kiankiz                 | 25 | 80  | типчаково-пырейно-однолетниковая / tirchak-wheatgrass-annual grass   | III |
| 15 | Кочубеевский / Kochubeyskiy               | Екатериновская / Ekaterinovskaya  | 23 | 100 | типчаково-люцерново-разнотравная / tirchak-alfalfa-mixed grass       | I   |
| 16 | Шпаковский / Shpakovskiy                  | Новый Бешпагир / Novyy Beshpagir  | 41 | 100 | типчаково-кострецово-разнотравная / tirchak-meadow-brome-mixed grass | I   |



Р и с. 2. Вегетационный индекс NDVI травянистой растительности в зоне неустойчивого увлажнения и в засушливой зоне Ставропольского края  
 F i g. 2. Vegetation index NDVI of herbaceous vegetation in the zone of unstable moisture and in the arid zone of the Stavropol Territory

Следует отметить, что в осенний период, когда в засушливой зоне на фоне осадков устанавливается относительно теплая погода, отмечается явно выраженное повышение NDVI травянистой растительности, чего не наблюдается в зоне неустойчивого увлажнения.

Ранее нами было установлено, что данные ДЗЗ могут быть использованы для оценки степени деградации естественных кормовых угодий, а разработанный на этой основе метод (метод анализа гистограмм NDVI, полученных в период максимума развития растительности) позволяет с помощью спутникового мониторинга характеризовать состояние степных травостоев [33]. Этот метод основан на том, что в период максимального травостоя существует связь между степенью деградации кормовых угодий с вегетационным индексом NDVI, который непосредственно связан с развитостью

растений (биомасса/площадь фотосинтетической поверхности, количество хлорофилла).

Мы несколько модифицировали метод и выбрали в качестве критерия оценки степени деградации травостоя площади его участков (доли в процентах от общей площади) с определенными значениями NDVI. Предполагается, что чем больше площадь участков с низкими значениями вегетационного индекса, тем более деградировано травянистое угодье.

В период максимального травостоя нами были построены картограммы вегетационного индекса NDVI исследованных полигонов (спектральные снимки сканеров Sentinel-2A/2B). Они рассчитаны по коэффициентам спектральной яркости каждого участка площадью 10x10 м. Далее была определена площадь полигона со значением NDVI травостоев в промежутке

от 0 до 1 с шагом 0,1 (с NDVI, находящимся в промежутках 0,0–0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,3; 0,3–0,4; 0,4–0,5; 0,5–0,6; 0,6–0,7; 0,7–0,8; 0,8–0,9 и 0,9–1,0). Затем была рассчитана их доля от площади всего полигона, которая и была использована в анализе (табл. 3, 4).

Полученные данные свидетельствуют о том, что существуют явные различия по величинам площадей с различными значениями NDVI в зоне неустойчивого увлажнения и в засушливой зоне. Так, в зоне неустойчивого увлажнения в среднем по исследованным полигонам максимальные площади занимают травостои с NDVI, находящимся в пределах 0,5–0,6; 0,6–0,7;

0,7–0,8 и 0,8–0,9. В засушливой зоне такие максимумы соответствуют пределам 0,1–0,2 и 0,2–0,3.

Таким образом, травостои, расположенные в различных почвенно-климатических зонах Ставропольского края, различаются не только характером изменений NDVI в течение вегетации и абсолютными его значениями, но и структурой площадей травостоев с различными значениями вегетационного индекса.

Мы рассчитали ранговую корреляцию степени деградации естественных травостоев с площадью, занимаемой травостоем с определенными значениями NDVI (рис. 3)

Таблица 3

Table 3

**Доли площадей полигонов, занимаемых растительностью с определенным значением NDVI, в период максимального травостоя (зона неустойчивого увлажнения Ставропольского края), %**

**The proportion of polygon areas occupied by vegetation with a certain NDVI value during the period of maximum herbage (zone of unstable moistening in the Stavropol Territory), %**

| Диапазон NDVI / NDVI range | Номера полигонов / Polygon numbers |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|----------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
|                            | 1                                  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   |  |
| 0,0–0,1                    |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 0,1–0,2                    |                                    |      |      |      |      |      | 5,8  |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 0,2–0,3                    |                                    | 2,2  |      |      | 0,3  |      | 7,7  |      |      | 91,7 |      | 2,4  | 2,1  |      |      |  |
| 0,3–0,4                    | 1,1                                | 4,3  | 1,4  | 3,8  | 1,9  | 1,4  | 19,2 |      | 0,5  | 7,6  |      | 0,7  | 28,2 |      | 2,9  |  |
| 0,4–0,5                    | 2,4                                | 20,5 | 6,8  | 11,5 | 11,9 | 6,8  | 34,6 | 0,1  | 2,3  | 0,6  |      | 3,3  | 51,4 | 0,3  | 11,1 |  |
| 0,5–0,6                    | 9,9                                | 55,5 | 55,0 | 46,2 | 31,4 | 55,0 | 26,9 | 0,6  | 22,6 | 0,1  | 10,9 | 9,2  | 17,8 | 14,1 | 53,9 |  |
| 0,6–0,7                    | 42,6                               | 17,5 | 36,8 | 38,5 | 39,1 | 36,8 | 5,8  | 7,5  | 60,4 |      | 31,0 | 35,3 | 0,5  | 75,9 | 28,3 |  |
| 0,7–0,8                    | 43,4                               |      |      |      | 15,4 |      |      | 8,9  | 14,2 |      | 57,9 | 49,1 |      | 9,7  | 3,8  |  |
| 0,8–0,9                    | 0,6                                |      |      |      |      |      |      | 82,9 |      |      | 0,2  |      |      |      |      |  |
| 0,9–1,0                    |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |

*Примечание.* 1 – Сенгилеевское; 2 – Ямки; 3 – Московское; 4 – Донское; 5 – Труновское; 6 – Безопасное; 7 – Дмитриевское; 8 – Старая Дорога; 9 – Найденовка; 10 – Кармалиновское; 12 – Невинномысск; 13 – Водораздел; 14 – Кианкиз; 15 – Екатеринбургская; 16 – Нижний Бешпагир.

*Note.* 1 – Sengileyskoye; 2 – Yamki; 3 – Moskovskoye; 4 – Donskoe; 5 – Trunovskoe; 6 – Bezopasnoye; 7 – Dmitriyevskoye; 8 – Staraya Doroga; 9 – Naydenovka; 10 – Karmalinovskoye; 12 – Nevinnomysk; 13 – Vodorazdel; 14 – Kiankiz; 15 – Ekaterinovskaya; 16 – Nizhniy Beshpagir.

Таблица 4  
Table 4

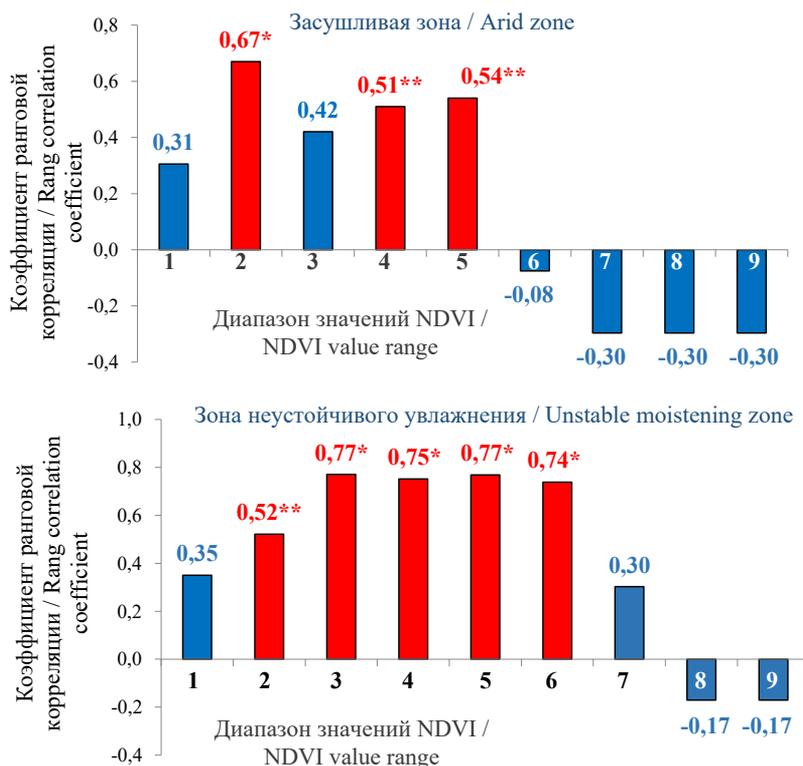
Доли площадей полигонов, занимаемых растительностью с определенным значением NDVI, в период максимального травостоя (засушливая зона Ставропольского края), %

The proportion of polygon areas occupied by vegetation with a certain NDVI value during the period of maximum herbage (zone of unstable moistening in the Stavropol Territory), %

| Диапазон NDVI / NDVI range | Номера полигонов / Polygon numbers |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                            | 1                                  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   |
| 0,0–0,1                    | 0,1                                | 1,9  | 0,2  | 0,1  | 0,3  |      |      | 0,1  | 0,0  | 2,4  | 0,3  |      |      | 2,1  | 1,3  |      |      |
| 0,1–0,2                    | 2,0                                | 89,0 | 1,6  | 70,2 | 38,2 | 99,2 | 0,4  | 21,0 | 77,1 | 8,9  | 62,1 | 71,5 | 3,1  | 46,9 | 14,0 | 0,5  | 89,9 |
| 0,2–0,3                    | 29,2                               | 8,0  | 80,4 | 23,5 | 13,4 | 0,8  | 99,0 | 79,0 | 22,8 | 89,5 | 35,1 | 20,1 | 43,8 | 47,8 | 80,6 | 5,6  | 10,1 |
| 0,3–0,4                    | 63,4                               | 1,1  | 17,7 | 0,9  | 0,7  |      | 0,6  |      |      | 1,6  | 0,4  | 5,4  | 53,1 | 2,3  | 4,1  | 14,5 |      |
| 0,4–0,5                    |                                    |      | 0,1  | 0,3  | 2,3  |      |      |      |      |      |      | 2,5  | 0,9  |      |      | 38,1 |      |
| 0,5–0,6                    | 4,3                                |      |      | 0,2  | 22,7 |      |      |      |      |      |      | 0,2  |      |      |      | 38,6 |      |
| 0,6–0,7                    | 1,0                                |      |      | 0,3  | 22,4 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 2,7  |
| 0,7–0,8                    |                                    |      |      | 4,5  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,8–0,9                    |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,9–1,0                    |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Примечание. 1 – Малая Джалга; 2 – Киевка; 3 – Дивное; 4 – Садовое; 5 – Родниковское; 6 – Петропавловское; 7 – Арзгир; 8 – Чограйское; 9 – Турксад; 10 – Левокумское; 11 – Приозерное; 12 – Урожайное; 13 – Бургун-Манджары; 14 – Зимняя Ставка; 15 – Ачикулак; 16 – Тукуй-Мектеб; 17 – Нефтекумск.

Note. 1 – Malaya Dzhhalga; 2 – Kievka; 3 – Divnoye; 4 – Sadovoye; 5 – Rodnikovskoye; 6 – Petropavlovskoye; 7 – Arzgir; 8 – Chograyskoye; 9 – Turksad; 10 – Levokumskoye; 11 – Priozernoye; 12 – Urozhaynoye; 13 – Burgun-Majary; 14 – Zimnaya Stavka; 15 – Achikulak; 16 – Tukui-Mekteb; 17 – Neftekumsk.



Диапазон значений NDVI / NDVI values range

1 – 0–0,2; 2 – 0–0,3; 3 – 0–0,4; 4 – 0–0,5; 5 – 0–0,6; 6 – 0–0,7; 7 – 0–0,8; 8 – 0–0,9; 9 – 0–1,0.

Р и с. 3. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между степенью деградации естественных кормовых угодий и площадью полигона, занимаемой травостоем с определенным значением вегетационного индекса NDVI (\* – значимо для  $p = 0,01$ ; \*\* – значимо для  $p = 0,05$ )

F i g. 3. Spearman's rank correlation coefficients between the degree of degradation of natural forage lands and the area of the landfill occupied by herbage with a certain value of the vegetation index NDVI (\* – significant for  $p = 0.01$ ; \*\* – significant for  $p = 0.05$ )

При проведении анализа по выявлению связи степени деградации естественных травостоев с данными ДДЗ наилучшие результаты были получены при использовании величин площадей полигонов со значениями вегетационного индекса в диапазонах: для зоны неустойчивого увлажнения 0,0–0,4 (коэффициент ранговой корреляции 0,771), для засушливой зоны 0,0–0,3 (коэффициент ранговой корреляции 0,670).

### Обсуждение и заключение

Таким образом, условия почвенно-климатических зон Ставропольского края оказывают существенное влияние не только на динамику вегетационного индекса NDVI травянистой растительности, но и на структуру площадей полигонов с определенным значением вегетационного индекса. Засушливая зона характеризуется меньшими размерами площадей полигона с более высокими значениями NDVI. В зоне

неустойчивого увлажнения наблюдается обратная закономерность.

В зоне неустойчивого увлажнения наиболее высокие коэффициенты ранговой корреляции между степенью деградации и площадью, занимаемой

травянистой растительностью с определенным значением вегетационного индекса, наблюдается в случае с NDVI, находящимся в пределах 0,0–0,4 ( $p = 0,01$ ), а в засушливой 0,0–0,3 ( $p = 0,01$ ).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Current State and Ways to Save the Steppe Ecosystems of Stavropol / N. Lapenko [et al.] // IAJPS. 2019. Vol. 6, Issue. 3. P. 6329–6336. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2604260>
2. Якутин М. В., Андриевский В. С., Пучнин А. Н. Почвенно-микробиологические и почвенно-зоологические методы в экологическом мониторинге луговых аласных почв Центральной Якутии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 4, № 2. С. 71–77. doi: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-4-2-71-77>
3. Черкашин А. К., Бибаева А. Ю. Натурные и дистанционные исследования и математическое моделирование горностепных экосистем на ландшафтной основе // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 4. С. 108–115. URL: <https://clck.ru/smaHL> (дата обращения: 01.04.2022).
4. Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian / K. N. Kulik [et al.] // Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10, Issue 2. P. 98–105. doi: <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
5. Возможность оценки степени развития растений озимой пшеницы в период «всходы – кушение» по данным дистанционного зондирования Земли / И. Г. Сторчак [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 1. С. 21–36. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.021-036>
6. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Оценивание параметров состояния агроценозов по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. С. 102–114. doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-102-114>
7. Шарый П. А., Шарая Л. С., Сидякина Л. В. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 4. С. 154–163. doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163>
8. Раевский Б. В., Тарасенко В. В., Петров Н. В. Оценка современного состояния и динамики растительных сообществ Онежского полуострова по разновременным спутниковым снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 145–155. doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-145-155>
9. Саинчук А. М., Стекольников К. Е. Влияние антропогенной эволюции на потенциальное плодородие чернозема обыкновенного в условиях каменной степи // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 4. С. 220–227. doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.4.220>
10. Goleusov P., Lisetskii F. Variants of Post-Agrogenic Soil Reproduction in Agrolandscapes (a Case Study in Belgorod Region) [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society (19–24 July 2021). Vol. 862. Syktyvkar, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012096>
11. Чибилев (мл.) А. А., Чибилев А. А. Современное состояние и проблемы модернизации природно-экологического каркаса регионов степной зоны Европейской России // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, № 1. С. 117–125. doi: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-1-117-125>
12. Пашков С. В., Мажитова Г. З. Агрогенная деградация лесостепных ландшафтов Северо-Казахстанской области // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 1. С. 140–152. URL: <https://clck.ru/smiRE> (дата обращения: 01.04.2022).

13. Кужугет С. К.-О. Влияние животноводства на пастбищные ландшафтно-геоэкологические системы Тувы // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2021. № 4. С. 56–63. URL: <https://clck.ru/sn49g> (дата обращения: 01.04.2022).
14. Changes in the Soil Microbial Communities of Alpine Steppe at Qinghai-Tibetan Plateau under Different Degradation Levels / H. Zhou [et al.] // The Science of the Total Environment. 2019. Vol. 651, Part 2. P. 2281–2291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.336>
15. Методы повышения продуктивности аридных пастбищ / В. Г. Гребенников [и др.] // Аграрная наука. 2020. № 9. С. 70–73. doi: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-341-9-70-73>
16. The Effects of the Aridity Phenomenon Intensification on the Vegetal Land Cover in the Eastern Romanian Plain / A. G. Vrinceanu [et al.] // 18<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2018: Conference Proceedings (02–08 July 2018). Albena : STEPH 92 Technologies LLC, 2018. P. 543–550. doi: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/3.2/S13.071>
17. Observed Ecological Communities are Formed by Species Combinations That are among the Most Likely to Persist under Changing Environments / L. Medeiros [et al.] // The American Naturalist. 2021. Vol. 197, Issue 1. P. 17–29. doi: <https://doi.org/10.1086/711663>
18. Проблемы адаптации степного землепользования к антропогенным и климатическим изменениям (на примере Оренбургской области) / Ю. А. Гулянов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86, № 1. С. 28–40. doi: <https://doi.org/10.31857/S258755662201006X>
19. Ильина Л. П., Сушко К. С. Современные проблемы деградации сухостепных почв долины Мангыч // Биосфера. 2019. Т. 11, № 3. С. 120–127. URL: <https://clck.ru/sn8We> (дата обращения: 01.04.2022).
20. Зверева Г. К., Сыева С. Я., Карнаухова Н. А. Оценка состояния растительности на природных кормовых угодьях Горного Алтая // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2019. № 1. С. 116–125. doi: <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2019-50-1-116-125>
21. Балыкин С. Н., Пузанов А. В., Рождественская Т. А. Трансформация криоаридных почв Самахинской степи под влиянием сельскохозяйственного использования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 9. С. 72–80. URL: <https://clck.ru/snBVn> (дата обращения: 01.04.2022).
22. Причинно-следственный анализ деградации экосистем бассейна Байкала на основе долговременного мониторинга сети модельных полигонов / С. Н. Бажа [и др.] // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27, № 2. С. 12–25. URL: <https://clck.ru/snC5N> (дата обращения: 01.04.2022).
23. Богданов Е. А., Климанова О. А., Гунин П. Д. Природные предпосылки и антропогенные факторы трансформации растительного покрова в пастбищных ландшафтах центральной Монголии // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151, № 3. С. 55–72. doi: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151355-72>
24. Фетисов Д. М., Жучков Д. В., Горюхин М. В. Оценка уровня озеленения города Биробиджана с применением мультиспектральных данных // Биосфера. 2021. Т. 13, № 4. С. 170–179. doi: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i4.648>
25. Информационное обеспечение современных систем земледелия в России / В. П. Якушев [и др.] // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91, № 8. С. 755–768. doi: <https://doi.org/10.31857/S0869587321080090>
26. Каверин Д. А., Панюков А. Н., Пастухов А. В. Анализ дистанционных спектральных индексов при исследовании сукцессий тундровой растительности в постагрогенных биогеоценозах // География и природные ресурсы. 2022. Т. 43, № 1. С. 121–131. doi: <https://doi.org/10.15372/GIPR20220113>
27. RS-Based Monitoring of NDVI Spatial Variations: A Case Study of Typical Grasslands on Mongolian Plateau / Tangkesi [et al.] // Nature of Inner Asia. 2019. Issue 2. P. 69–86. doi: <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2019-2-69-86>
28. Мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий степной и лесостепной зон России с использованием современных информационных технологий / Ю. А. Гулянов [и др.] // Вопросы степеведения. 2021. № 4. С. 75–81. doi: <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2021-4-75-81>

29. О применении NDVI для мониторинга состояния степных и пустынных экосистем Гоби / П. Д. Гунин [и др.] // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25, № 3. С. 45–52. URL: <https://clck.ru/snJQ5> (дата обращения: 01.04.2022).

30. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий / Ф. В. Ерошенко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 53–66. doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66>

31. Do Vegetation Indices Provide a Reliable Indication of Vegetation Degradation? A Case Study in the Mongolian Pastures / A. Karnieli [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34, Issue 17. P. 6243–6262. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.793865>

32. Работнов Т. А. К методике наблюдения над травянистыми растениями на постоянных площадках // Ботанический журнал. 1964. Т. 36, № 6. С. 47–50.

33. Лапенко Н. Г., Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г. Растительность степных фитоценозов и особенности ее вегетации в условиях Ставропольского края // Аграрный вестник Урала. 2020. № 2. С. 9–17. doi: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-193-2-9-19>

*Поступила 04.04.2022; одобрена после рецензирования 18.05.2022; принята к публикации 08.06.2022*

*Об авторах:*

**Ерошенко Федор Владимирович**, заведующий отделом физиологии растений Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), доктор биологических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0238-3861>, Researcher ID: [AAB-4769-2020](https://orcid.org/0000-0003-0238-3861), [yer-sniish@mail.ru](mailto:yer-sniish@mail.ru)

**Лапенко Нина Григорьевна**, ведущий научный сотрудник лаборатории лугопастбищного кормопроизводства Всероссийского НИИ овцеводства и козоводства филиала Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), кандидат биологических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3856-690X>, Researcher ID: [AAB-5713-2020](https://orcid.org/0000-0003-3856-690X), [sniish\\_stepi@mail.ru](mailto:sniish_stepi@mail.ru)

**Сторчак Ирина Геннадьевна**, старший научный сотрудник отдела физиологии растений Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8741-6882>, Researcher ID: [AAB-4142-2020](https://orcid.org/0000-0001-8741-6882), [sniish.storchak@gmail.com](mailto:sniish.storchak@gmail.com)

**Бильдиева Евгения Александровна**, ведущий научный сотрудник лаборатории оценки экологического состояния агроценозов Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3049-8199>, Researcher ID: [AAB-4726-2020](https://orcid.org/0000-0003-3049-8199), [bildieva@rambler.ru](mailto:bildieva@rambler.ru)

**Костицын Роман Денисович**, младший научный сотрудник лаборатории лугопастбищного кормопроизводства Всероссийского НИИ овцеводства и козоводства филиала Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), аспирант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5690-5613>, Researcher ID: [AGK-3291-2022](https://orcid.org/0000-0002-5690-5613), [romancostitsyn@yandex.ru](mailto:romancostitsyn@yandex.ru)

**Старостина Мария Александровна**, научный сотрудник испытательной лаборатории шерсти Всероссийского НИИ овцеводства и козоводства филиала Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0086-4258>, Researcher ID: [AGK-3753-2022](https://orcid.org/0000-0003-0086-4258), [lapenko62@yandex.ru](mailto:lapenko62@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Ф. В. Ерошенко – формулирование основной концепции, анализ космоснимков и интерпретация данных, доработка первоначального текста с учетом полученных данных.

Н. Г. Лапенко – проведение исследований, анализ состава природных травянистых сообществ, подготовка начального варианта текста.

И. Г. Сторчак – проведение исследований, получение и обработка данных спутникового мониторинга.

Е. А. Бильдиева – проведение исследований, анализ литературных данных, доработка текста.

Р. Д. Костицын – проведение исследований.

М. А. Старостина – проведение исследований.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Lapenko N., Godunova E., Dudchenko L., et al. Current State and Ways to Save the Steppe Ecosystems of Stavropol. *IAPPS*. 2019;6(3):6329–6336. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2604260>
2. Yakutin M.V., Andrievskiy V.S., Puchnin A.N. Soil Microbiological and Soil Zoological Methods in Environmental Monitoring of Alas Meadow Soils of Central Yakutia. *Interekspo Geo-Sibir*. 2020;4(2):71–77. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-4-2-71-77>
3. Cherkashin A.K., Bibaeva A.Yu. Field and Remote Researches and Mathematical Modeling of Mountain-Steppe Ecosystems on Landscape Basis. *Aridnye ekosistemy*. 2020;26(4):108–115. Available at: <https://clck.ru/smaHL> (accessed 01.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., et al. Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian. *Arid Ecosystems*. 2020;10(2):98–105. doi: <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
5. Storchak I.G., Eroshenko F.V., Oganyan L.R., et al. Assessment of Winter Wheat Plant Development during the Seeding and Tillering Stages According to the Earth Remote Sensing Data. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(1):21–36. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.021-036>
6. Mikhailenko I.M., Timoshin V.N. Estimation of the Parameters of Agroecosystem State from Earth Remote Sensing Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021;18(4):102–114. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-102-114>
7. Shary P.A., Sharaya L.S., Sidiyakina L.V. The Relation of Forest NDVI to Climate in Volga Basin. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020;17(4):154–163. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163>
8. Raevsky B.V., Tarasenko V.V., Petrov N.V. Inventory of the Current State and Changes in Vegetation Cover of the Onega Peninsula Using Staggered Landsat Images. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021;18(5):145–155. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-145-155>
9. Sainchuk A.M., Stekolnikov K.E. Impact of Anthropogenic Evolution on Potential Fertility of Ordinary Chernozem in the Stone Steppe. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(4):220–227. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.4.220>
10. Goleusov P., Lisetskii F. Variants of Post-Agrogenic Soil Reproduction in Agrolandscapes (a Case Study in Belgorod Region). In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society (19–24 July 2021). Vol. 862. Syktyvkar; 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012096>
11. Chibilyov (jr.) A.A., Chibilyov A.A. Current State and Problems of Modernization of Ecological Framework of Regions of the Steppe Zone of European Russia. *South of Russia: Ecology, Development*. 2019;14(1):117–125. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-1-117-125>
12. Pashkov S.V., Mazhitova G.Z. Agrogene Degradation of Forestand Steppe Landscapes in North Kazakhstan Region. *Uchenye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019;5(1):140–152. Available at: <https://clck.ru/smiRE> (accessed 01.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kuzhuget S.K.-O. The Current State of Pasture Landscape and Geoecological Systems of Tuva. *Vestnik Tivinskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennye i sel'skokhozyaystvennye nauki*. 2021;(4):56–63. Available at: <https://clck.ru/sn49g> (accessed 01.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

14. Zhou H., Zhang D., Jiang Zh., et al. Changes in the Soil Microbial Communities of Alpine Steppe at Qinghai-Tibetan Plateau under Different Degradation Levels. *The Science of the Total Environment*. 2019;651(2):2281–2291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.336>
15. Grebennikov V.G., Lapenko N.G., Shipilov I.A., Khonina O.V. Methods for Increasing Productivity of Arid Pastures. *Agrarian Science*. 2020;(9):70–73. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-341-9-70-73>
16. Vrinceanu A.G., Lacatusu A.R., Anghel A., et al. The Effects of the Aridity Phenomenon Intensification on the Vegetal Land Cover in the Eastern Romanian Plain. In: 18<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2018: Conference Proceedings (02–08 July 2018). Albena: STEPH 92 Technologies LLC; 2018. p. 543–550. doi: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/3.2/S13.071>
17. Medeiros L., Boege K., del-Val E., et al. Observed Ecological Communities are Formed by Species Combinations That are among the Most Likely to Persist under Changing Environments. *The American Naturalist*. 2021;197(1):17–29. doi: <https://doi.org/10.1086/711663>
18. Gulyanov Yu.A., Chibilyov (Jr.) A.A., Chibilyov A.A., Levykin S.V. Problems of Steppe Land Use Adaptation to Anthropogenic and Climatic Changes (The Case of Orenburg Oblast). *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2022;86(1):28–40. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S258755662201006X>
19. Ilina L.P., Sushko K.S. Current Problems of Dry-Steppe Soil Degradation in Manych Valley. *Biosfera*. 2019;11(3):120–127. Available at: <https://clck.ru/sn8We> (accessed 01.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Zvereva G.K., Syeva S.I., Karnaukhova N.A. Estimation of Vegetation on the Forage Lands of Gornyy Altai. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2019;(1):116–125. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2019-50-1-116-125>
21. Balykin S.N., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A. Cryoarid Soil Transformation in the Samakha Steppe under the Agricultural Use Effect. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2018;(9):72–80. Available at: <https://clck.ru/snBVn> (accessed 01.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Bazha S.N., Andreev A.V., Bogdanov Ye.A., et al. Cause and Effect Analysis of the Ecosystem Degradation of the Baikal Basin Based on Long-Term Monitoring in the Model Reference Network. *Aridnye ekosistemy*. 2021;27(2):12–25. Available at: <https://clck.ru/snC5N> (accessed 01.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Bogdanov E.A., Klimanova O.A., Gunin P.D. Natural Background and Anthropogenic Drivers of Vegetation Cover Changes in Pasture Landscape: The Case of Central Mongolia. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2019;151(3):55–72. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151355-72>
24. Fetisov D.M., Zhuchkov D.V., Goryukhin M.V. Estimating the Greenness Level of Birobidzhan City Using Remote Sensing Data. *Biosfera*. 2021;13(4):170–179. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i4.648>
25. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu., et al. [Information Support for Modern Farming Systems in Russia]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2021;91(8):755–768. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.31857/S0869587321080090>
26. Kaverin D.A., Panjukov A.N., Pastukhov A.V. Analysis of Remote Spectral Indices in the Study of Successional Changes of Tundra Vegetation in Post-Agrogenous Biogeocenoses. *Geografia i prirodnye resursy*. 2022;43(1):121–131. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15372/GIPR20220113>
27. Tangkesi, Wulantuya, Doljin D., Surina. RS-Based Monitoring of NDVI Spatial Variations: A Case Study of Typical Grasslands on Mongolian Plateau. *Nature of Inner Asia*. 2019;(2):69–86. doi: <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2019-2-69-86>
28. Gulyanov Yu.A., Yartsev G.F., Vasilev I.V., et al. Assessment of the State of Agricultural Lands of the Steppe and Forest-Steppe Zones of Russia Using Modern Information Technologies. *Steppe Science*. 2021;(4):75–81. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2021-4-75-81>
29. Gunin P.D., Dedkov V.P., Danzhalova Ye.V. [On the Application of NDVI to Monitor the State of Steppe and Desert Ecosystems in the Gobi]. *Aridnye ekosistemy*. 2019;25(3):45–52. Available at: <https://clck.ru/snJQ5> (accessed 01.04.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

30. Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., et al. Capabilities for Rangelands State and Degradation Assessment Using Remote Sensing Data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018;15(7):53–66. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66>
31. Karnieli A., Bayarjargal Y., Bayasgalan M., et al. Do Vegetation Indices Provide a Reliable Indication of Vegetation Degradation? A Case Study in the Mongolian Pastures. *International Journal of Remote Sensing*. 2013;34(17):6243–6262. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.793865>
32. Rabotnov T.A. [To the Methodology of Observation of Herbaceous Plants on Permanent Plots]. *Botanicheskiy zhurnal*. 1964;36(6):47–50. (In Russ.)
33. Lapenko N.G., Yeroshenko F.V., Storchak I.G. Vegetation of Steppe Phytocenoses and Features of Its Vegetation under Complicated Conditions of the Stavropol Krai. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020; (2):9–17. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-193-2-9-19>

*Submitted 04.04.2022; approved after reviewing 18.05.2022; accepted for publication 08.06.2022*

*About the authors:*

**Fedor V. Eroshenko**, Head of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Dr.Sci. (Biol.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0238-3861>, Researcher ID: [AAB-4769-2020](https://orcid.org/0000-0003-0238-3861), [yer-sniish@mail.ru](mailto:yer-sniish@mail.ru)

**Nina G. Lapenko**, Senior Researcher at the Laboratory of Meadow and Pasture Fodder Production, All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Husbandry, Branch of the North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Cand.Sci. (Biol.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3856-690X>, Researcher ID: [AAB-5713-2020](https://orcid.org/0000-0003-3856-690X), [sniish\\_stepi@mail.ru](mailto:sniish_stepi@mail.ru)

**Irina G. Storchak**, Senior Researcher of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Cand. Sci. (Agric.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8741-6882>, Researcher ID: [AAB-4142-2020](https://orcid.org/0000-0001-8741-6882), [sniish.storchak@gmail.com](mailto:sniish.storchak@gmail.com)

**Evgeniya A. Bildieva**, Principal Researcher at the Laboratory of Environmental Assessment of Agrocenoses, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Cand.Sci. (Agric.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3049-8199>, Researcher ID: [AAB-4726-2020](https://orcid.org/0000-0003-3049-8199), [bildieva@rambler.ru](mailto:bildieva@rambler.ru)

**Roman D. Kostitsyn**, Researcher at the Laboratory of Meadow and Pasture Fodder Production, All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Husbandry, Branch of the North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Postgraduate Student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5690-5613>, Researcher ID: [AGK-3291-2022](https://orcid.org/0000-0002-5690-5613), [romancostitsyn@yandex.ru](mailto:romancostitsyn@yandex.ru)

**Mariya A. Starostina**, Researcher in the Wool Testing Laboratory, All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Husbandry, Branch of the North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0086-4258>, Researcher ID: [AGK-3753-2022](https://orcid.org/0000-0003-0086-4258), [lapenko62@yandex.ru](mailto:lapenko62@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

F. V. Eroshenko – formulation of the basic concept, analysis of satellite imagery and data interpretation, refinement of the original text taking into account the data obtained.

N. G. Lapenko – conducting the research, analyzing the composition of natural herbaceous communities, preparing the initial version of the text.

I. G. Storchak – conducting the research, receiving and processing satellite monitoring data.

E. A. Bildieva – conducting research, analyzing literary data, finalizing the text.

R. D. Kostitsyn – conducting research.

M. A. Starostina – conducting research.

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



## Алгоритм решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями

Е. В. Антипина<sup>1</sup> ✉, С. А. Мустафина<sup>2</sup>, А. Ф. Антипин<sup>1</sup>,  
Н. Д. Морозкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета (г. Стерлитамак, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет (г. Уфа, Российская Федерация)

✉ [stepashinaev@ya.ru](mailto:stepashinaev@ya.ru)

### Аннотация

**Введение.** Задача определения оптимальных режимных параметров при математическом моделировании химико-технологических процессов является важнейшей задачей. Численные методы и алгоритмы решения создают основу для разработки программных комплексов для расчета процессов и их цифровых двойников. Математическую модель химико-технологического процесса можно описать системой дифференциальных уравнений, выделив фазовые переменные, определяющие состояние процесса, и параметры управления, которые можно изменять и влиять тем самым на течение процесса. Целью работы является разработка численного алгоритма решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом при наличии терминальных ограничений и ограничений на параметр управления.

**Материалы и методы.** Сформулирована задача оптимального управления в общем виде. Для ее решения применены метод штрафов и метод искусственных иммунных систем. Описан способ включения ограничений в функцию штрафа и выбора последовательности коэффициентов, с которыми берется штраф. Для преодоления локальных экстремумов использован случайный выбор начальных значений управляющих параметров.

**Результаты исследования.** Приведен пошаговый численный алгоритм решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями. Проведен вычислительный эксперимент для модельного примера, в результате которого определена структура оптимального управления процессом и соответствующие оптимальные траектории фазовых переменных. Показано, что рассчитанное решение задачи оптимального управления согласуется с решением, полученным методом игольчатой линеаризации.

**Обсуждение и заключение.** Разработанный алгоритм позволяет найти численное решение задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями. Решение не зависит от выбора начального приближения.

© Антипина Е. В., Мустафина С. А., Антипин А. Ф., Морозкин Н. Д., 2022



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

**Ключевые слова:** задача оптимального управления, терминальные ограничения, метод штрафов, искусственные иммунные системы, химико-технологический процесс

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FZWU-2020-0027).

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

**Для цитирования:** Алгоритм решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями / Е. В. Антипина [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 410–422. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.410-422>

Original article

## Algorithm for Solving the Problem of Optimal Control of a Chemical-Technological Process with Terminal Constraints

E. V. Antipina<sup>a</sup>✉, S. A. Mustafina<sup>b</sup>, A. F. Antipin<sup>a</sup>,  
N. D. Morozkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Sterlitamak Branch of Bashkir State University  
(Sterlitamak, Russian Federation)

<sup>b</sup> Bashkir State University (Ufa, Russian Federation)

✉ [stepashinaev@ya.ru](mailto:stepashinaev@ya.ru)

### Abstract

**Introduction.** The problem of determining the optimal mode parameters during the mathematical modeling of chemical and technological processes is the most important. Numerical methods and algorithms for the solution provide the basis for developing software packages to calculate processes and their digital twins. The mathematical model of the chemical-technological process can be described by a system of differential equations, highlighting the phase variables that determine the state of the process, and the control parameters, which can be changed and thereby affect the course of the process. The aim of the work is to develop a numerical algorithm for solving the problem of optimal control of a chemical-technological process in the presence of terminal constraints and the constraints on the control parameter.

**Materials and Methods.** There was formulated the problem of optimal control in general terms. To solve it, the penalty method and method of artificial immune systems were applied. There was described a method for including constraints in the penalty function and for choosing a sequence of coefficients with which the penalty is taken. To overcome local extrema, a random choice of initial values of control parameters was used.

**Results.** The article presents a step-by-step numerical algorithm for solving the problem of optimal control of a chemical-technological process with terminal constraints. A computational experiment was carried out for a model example, as a result of which the structure of the optimal process control and the corresponding optimal trajectories of phase variables are determined. It is shown that the calculated solution of the optimal control problem consists with the solution obtained by the needle linearization method.

**Discussion and Conclusion.** The developed algorithm allows finding a numerical solution to the problem of optimal control of a chemical-technological process with terminal constraints. The solution does not depend on the choice of the initial approximation.

**Keywords:** optimal control problem, terminal constraints, penalty method, artificial immune systems, chemical-technological process

**Funding:** This study was performed within the state task from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific project code no. FZWU-2020-0027).

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

**For citation:** Antipina E.V., Mustafina S.A., Antipin A.F., Morozkin N.D. Algorithm for Solving the Problem of Optimal Control of a Chemical-Technological Process with Terminal Constraints. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):410–422. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.410-422>

## Введение

Основная задача промышленного предприятия состоит в максимально эффективном использовании имеющихся ресурсов с минимальными издержками производства. Решить данную проблему можно путем применения цифровых двойников химико-технологических процессов. Это позволит смоделировать работу технологической установки или конкретный химико-технологический процесс.

Поэтому возникает необходимость в установлении тесной связи производства и научных организаций для создания новых цифровых технологий и решения ряда задач по оптимизации и модернизации, в частности определения оптимальных параметров проведения химико-технологических процессов в различных условиях.

Задачу определения оптимальных режимных параметров ведения химико-технологических процессов можно решить путем применения методов математического моделирования. Для ее формализации необходимо составить математическую модель процесса (например в виде системы дифференциальных уравнений), выделить управляющие параметры и область их изменения, а также обозначить критерий качества управления. В задачах оптимального управления ограничения могут быть наложены не только на управляющие параметры, но и на фазо-

вые переменные. Если ограничения на фазовые переменные заданы в конечный момент времени функционирования системы, то такая задача является задачей с терминальными ограничениями [1]. Разработка численных методов решения задачи оптимального управления с терминальными ограничениями представляет научный и практический интерес, поскольку более сложные задачи с фазовыми и промежуточными ограничениями могут быть сведены к терминальным задачам путем применения математических редукций [2].

Цель работы – разработка численного алгоритма решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями.

## Обзор литературы

Для решения задач оптимального управления с фазовыми ограничениями существует несколько подходов. Один из них предполагает вывод точных условий оптимальности и исследование свойств получаемых решений [3; 4]. Необходимые условия оптимальности решений задач оптимального управления с фазовыми ограничениями в форме принципа максимума Понтрягина получены как в работах российских авторов [5; 6], так и в зарубежных исследованиях [7; 8]. Однако при разработке численных алгоритмов решения задач оптимального управления данный подход трудно реализовать на практике.

Другой подход основан на применении метода штрафов для практической реализации алгоритмов решения задачи оптимального управления с ограничениями, наложенными на фазовые переменные. Основная идея метода штрафов заключается в замене задачи с фазовыми ограничениями на задачу без ограничений путем добавления «штрафа» к критерию оптимальности. При этом последовательность решений новой задачи оптимального управления дает решение исходной задачи.

Разработке методов решения задач оптимального управления с терминальными ограничениями на основе метода штрафа посвящен ряд работ [9–13]. Численная реализация данного метода представлена в работах, в которых последовательность оптимизационных задач без ограничений решается с помощью градиентного метода [14; 15]. Однако недостатком градиентных методов является чувствительность решения оптимизационной задачи к выбору начального приближения, что может привести к попаданию решения в локальный экстремум или в область, противоречащую физическому смыслу задачи.

Основные трудности, возникающие при программной реализации методов решения задач оптимального управления, связаны с нелинейностью описания процесса, высокой размерностью пространства поиска, наличием фазовых ограничений, а также чувствительностью найденного решения к начальной точке поиска [16; 17]. Преодолеть перечисленные трудности позволяет применение эволюционных методов оптимизации, к которым относится метод искусственных иммунных систем.

Метод искусственных иммунных систем основан на имитации функционирования иммунной системы живых организмов. Функционирование заключается в защите от неблагоприят-

ных внешних воздействий (патогенов, антигенов) [18–20]. В этом процессе основную роль играют защитные клетки – антитела, вырабатываемые иммунными клетками и претерпевающие изменения в ходе борьбы с антигенами и патогенами. Наиболее приспособленные для защиты антитела подавляют чужеродные тела, и именно эти клетки заподинает иммунная система для их воспроизведения при повторной атаке организма схожим патогеном.

В настоящее время искусственные иммунные системы находят широкое применение при решении задач распознавания образов [21], прогнозирования [22], классификации [23], оптимизации [24] и оптимального управления [25].

По сравнению с классическими методами оптимизации метод искусственных иммунных систем обладает рядом преимуществ, к которым можно отнести независимость найденного решения оптимизационной задачи от начального приближения. Отсутствие чувствительности решения задачи к начальному приближению достигается за счет того, что в начале поиска задается набор векторов возможных решений, которые заполняются случайными допустимыми значениями и в ходе работы алгоритма путем применения операторов метода претерпевают изменения, приближаясь к решению оптимизационной задачи. По сравнению с другими эволюционными методами искусственные иммунные системы оперируют в своей работе лучшими решениями, найденными на предыдущей итерации поиска, что позволяет применять их при решении задач мультимодальной оптимизации [26].

В настоящей работе представлен пошаговый алгоритм для поиска численного решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными

ограничениями и его апробация на модельном примере.

### Материалы и методы

Пусть динамика протекания химико-технологического процесса описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t), t) \quad (1)$$

с начальными условиями

$$x(0) = x^0, \quad (2)$$

где  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$  – вектор фазовых переменных;  $u(t) \in U$  – параметр управления;  $U$  – множество допустимых значений управления;  $t \in [0, t_1]$  – время,  $f(x(t), u(t), t) = (f_1(x(t), u(t), t), f_2(x(t), u(t), t), \dots, f_n(x(t), u(t), t))^T$  – вектор-функция, непрерывная вместе со своими частными производными [27].

Пусть множество  $U$  задается неравенством

$$u_a \leq u(t) \leq u_b, \quad (3)$$

где  $u_a, u_b$  – верхняя и нижняя допустимые границы значений параметра управления.

Пусть на фазовые переменные в момент времени  $t_1$  наложены ограничения:

$$r_j(x(t_1)) = 0, \quad j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$r_j(x(t_1)) \leq 0, \quad j = \overline{m+1, p}, \quad (5)$$

где  $r_j(x)$  – непрерывно дифференцируемые функции.

Введем функционал качества управления:

$$R(u) = r_0(x(t_1)) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Требуется для химико-технологического процесса, описываемого системой дифференциальных уравнений (1) с начальными условиями (2), найти та-

кую управляющую функцию  $u^*(t) \in U$ , с учетом ограничений (4), (5), для которой критерий оптимальности (6) принимает минимальное значение.

Для решения задачи оптимального управления (1)–(6) применим метод штрафов и метод искусственных иммунных систем.

Для того чтобы применить метод штрафов, необходимо построить новый критерий оптимальности, содержащий штрафной функционал  $W(u, s^k)$ , значение которого равно нулю при выполнении ограничений (4), (5) и больше нуля в противном случае. Поэтому введем в рассмотрение критерий оптимальности

$$P(u) = R(u) + W(u, s^k) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $W(u, s^k)$  – штрафной функционал, определяемый по формуле

$$W(u, s^k) = \frac{s^k}{2} \left( \sum_{j=1}^m |r_j(x(t_1))|^2 + \sum_{j=m+1}^p (\max(0, r_j(x(t_1))))^2 \right),$$

где  $k$  – номер итерации,  $s^k$  – параметр штрафа.

На каждой итерации поиска решения необходимо найти решение задачи оптимального управления без ограничений. Найденный параметр управления  $u^*(t)$  становится начальным для следующей итерации с увеличенным значением параметра штрафа.

Последовательность решений задачи оптимального управления (1)–(3), (7) дает решение исходной задачи (1)–(6).

Для решения задачи оптимального управления (1)–(3), (7) применим метод искусственных иммунных систем. Критерий оптимальности (7) соответствует понятию приспособленности иммунной клетки к борьбе с антигенами и патогенами и представляет собой фитнес-функцию. Пусть иммунной клеткой является вектор управляющих

параметров  $u = (u_1, u_2, \dots, u_i)$ , а набор из  $count\_u$  таких векторов составляет популяцию

$$u^i = (u_1^i, u_2^i, \dots, u_i^i), i = \overline{1, count\_u}. \quad (8)$$

Наиболее приспособленной иммунной клетке  $u$  соответствует наименьшее значение фитнес-функции (7), так как решается задача на поиск минимума критерия оптимальности.

### Результаты исследования

Сформулируем численный алгоритм решения задачи оптимального управления с терминальными ограничениями, основанный на комбинации метода штрафов и метода искусственных иммунных систем:

1. Задать параметры алгоритма искусственных иммунных систем: начальное значение параметра штрафа  $s^0$ , размер популяции  $count\_u$ , количество иммунных клеток с наихудшим значением фитнес-функции  $maxf$ , количество клеток-родителей для селекции  $sel$ , количество клонов для оператора клонирования  $klon$ , параметр оператора мутации  $mut$ , параметры завершения поиска решения  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ .

2. Случайным образом заполнить начальную популяцию иммунных клеток (8) допустимыми значениями из области  $U$ .

3. Вычислить значение фитнес-функции (7) для каждой иммунной клетки  $u^i, i = \overline{1, count\_u}$ .

4. Применить к текущей популяции оператор клонирования. Для этого выбрать наиболее приспособленные иммунные клетки (клетки-родители) и создать для каждой  $klon$  копий.

5. Применить к каждому вектору-клону оператор мутации. Для этого сгенерировать случайные числа  $q_1 \in [0, u_b - u_j^i], q_2 \in [0, u_j^i - u_a], q_3 \in [0, 1]$  для каждой клетки-родителя. Координаты клона вычислить по формуле [28]:

$$u_{mut}^i = \begin{cases} u_j^i + q_1 \cdot mut, & q_3 > 0,5, \\ u_j^i - q_2 \cdot mut, & q_3 \leq 0,5. \end{cases}$$

6. Вычислить значение фитнес-функции (7) для каждой клетки-мутанта.

7. Применить к каждому клону-мутанту оператор селекции. Для этого выбрать среди них наиболее приспособленные клетки и поместить в популяцию вместо клетки-родителя при условии, что она менее приспособлена по сравнению с клоном-мутантом.

8. Случайным образом сгенерировать  $maxf$  новых иммунных клеток и вычислить для них значение фитнес-функции.

9. Выбрать из популяции  $maxf$  наименее приспособленные иммунные клетки и заменить их новыми клетками.

10. Проверить условие окончания поиска решения задачи оптимального управления без ограничений. Если изменение значения фитнес-функции не превышает заданной малой величины  $\varepsilon_1$ , то выбрать из последней популяции клетку  $u^*$  с наименьшим значением фитнес-функции, иначе перейти к шагу 4.

11. Проверить условие окончания работы алгоритма. Если  $W(u^*, s^k) > \varepsilon_2$ , то увеличить штраф по правилу:

$$s^{k+1} = 10 \cdot s^k.$$

В качестве начальной популяции для следующей итерации алгоритма задать наиболее приспособленную иммунную клетку  $u^*$ . Затем перейти к шагу 4.

Если  $W(u^*, s^k) \leq \varepsilon_2$ , то остановить работу алгоритма. Решением задачи оптимального управления будет наиболее приспособленная иммунная клетка  $u^*$  из последней популяции.

Найдем численное решение задачи оптимального управления с терминальными ограничениями с помощью описанного алгоритма.

Пусть химико-технологический процесс описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u, \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1, \end{cases} \quad (9)$$

где  $x(t) = (x_1(t), x_2(t))$  – вектор фазовых переменных;  $u(t)$  – параметр управления;  $t \in [0, 1]$  – время функционирования системы.

Область допустимых значений параметра управления задается неравенством:

$$|u(t)| \leq 1. \quad (10)$$

Пусть заданы начальные значения фазовых переменных:

$$x_1(0) = x_2(0) = 0. \quad (11)$$

На значение фазовой переменной  $x_1$  в конечный момент времени наложено ограничение вида

$$x_1(1) = 0. \quad (12)$$

Пусть критерий оптимальности имеет вид

$$R(u) = \int_0^1 x_2(t) dt \rightarrow \min. \quad (13)$$

Необходимо для химико-технологического процесса, описываемого системой обыкновенных дифференциальных уравнений (9) с начальными условиями (10), найти такое управление  $u^*(t)$ , при котором выполнены ограничения (10), (12) и достигается минимум критерия оптимальности (13).

Критерий оптимальности со штрафным функционалом в нашем случае имеет вид

$$P(u) = \int_0^1 x_2(t) dt + \frac{s^k}{2} (x_1(1))^2 \rightarrow \min. \quad (14)$$

Для решения поставленной задачи оптимального управления в среде визуального программирования Delphi реализовано программное средство, в основу которого положен разработанный комбинированный алгоритм.

Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (9) с начальными условиями (11) найдено с помощью метода Рунге – Кутты четвертого порядка.

Разработанный алгоритм применен со следующими параметрами:  $s^0 = 0,01$ ,  $count\_u = 40$ ,  $maxf = 10$ ,  $sel = 15$ ,  $klon = 10$ ,  $mut = 0,5$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 10^{-4}$ .

В результате решения задачи (9)–(13) с помощью разработанного алгоритма определено оптимальное управление  $u^*(t)$  (рис. 1) и соответствующая ему оптимальная траектория процесса (рис. 2). При этом  $R_{\min}(u^*) = -0,2497$ , а  $x_1(1) = -2,4 \cdot 10^{-17}$ .

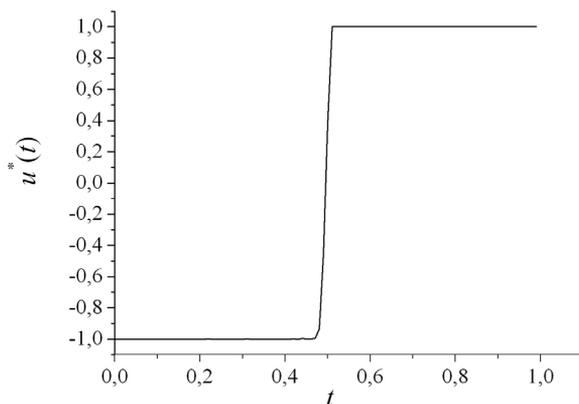
Для оценки решения задачи (9)–(13), найденного с помощью разработанного комбинированного алгоритма, сравним его с решением, полученным в работе В. А. Срочко с помощью метода игольчатой линеаризации (обозначим его  $u_{ll}^*(t)$ )<sup>1</sup>.

Согласно В. А. Срочко,

$$u_{ll}^*(t) = \begin{cases} -1, & t \in \left[0, \frac{1}{2}\right], \\ 1, & t \in \left(\frac{1}{2}, 1\right]. \end{cases}$$

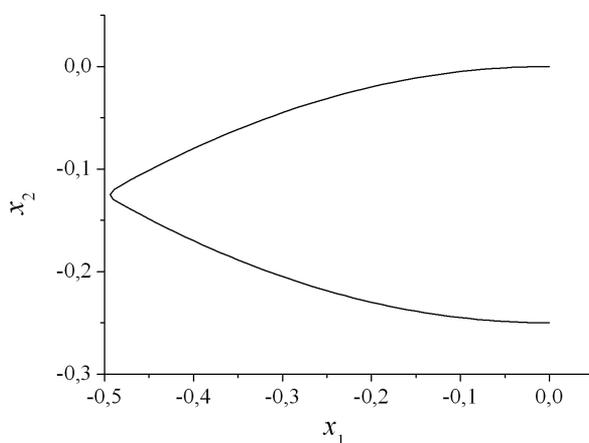
Относительная погрешность рассчитанного вектора оптимального управления  $u^*$  составила  $\delta(u^*) = 1,9\%$ , поэтому можно сделать вывод о корректной работе комбинированного

<sup>1</sup> Срочко В. А. Итерационные методы решения задач оптимального управления. М. : Физматлит, 2000. 160 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000686861> (дата обращения: 10.05.2022).



Р и с. 1. Оптимальное управление

F i g. 1. Optimal control



Р и с. 2. Оптимальная траектория процесса

F i g. 2. Optimal process trajectory

алгоритма решения задачи оптимального управления химико-технологическим процессом с терминальными ограничениями.

### Обсуждение и заключение

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет найти решение задачи оптимального управления химико-технологическим процессом при наличии ограничений на фазовые переменные и на параметр управления. Работа алгоритма основана на применении метода штрафов и метода искусственных иммунных систем. С помощью метода

штрафов исходная задача с терминальными ограничениями сводится к задаче оптимального управления без ограничений, решение которой ищется с помощью метода искусственных иммунных систем. Особенностью разработанного алгоритма решения задачи оптимального управления с терминальными ограничениями является независимость от начальной точки поиска решения.

С помощью алгоритма проведен вычислительный эксперимент для модельной задачи оптимального управления химико-технологическим процессом.

В результате расчетов определены параметры оптимального управления, обеспечивающего достижение минимального значения критерия оптимальности, и соответствующая оптимальная траектория процесса. Приведено

сравнение полученного численного решения модельной задачи с решением, рассчитанным с помощью метода игольчатой линеаризации. Показано, что относительная погрешность найденного решения не превышает 2 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Численный алгоритм решения задачи оптимального управления с терминальными ограничениями для динамических систем / Е. В. Антипина [и др.] // Автометрия. 2020. Т. 56, № 6. С. 132–140. doi: <https://doi.org/10.15372/AUT20200615>
2. Горнов А. Ю. Алгоритмы решения задач оптимального управления с терминальными ограничениями // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, № 4. С. 44–50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11913113> (дата обращения: 10.05.2022).
3. Benita F., Mehlihtz P. Optimal Control Problems with Terminal Complementarity Constraints // SIAM Journal on Optimization. 2018. Vol. 28, Issue 4. P. 3079–3104. doi: <https://doi.org/10.1137/16M107637X>
4. Iori T., Kawano Yu., Ohtsuka T. Algebraic Approach to Nonlinear Optimal Control Problems with Terminal Constraints: Sufficient Conditions for Existence of Algebraic Solutions // SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration. 2018. Vol. 11, Issue 3. P. 198–206. doi: <https://doi.org/10.9746/jcmsi.11.198>
5. Карамзин Д. Ю. Принцип максимума Понтрягина для задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями при ослабленных предположениях управляемости // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. 2018. № 20. С. 46–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36422015> (дата обращения: 10.05.2022).
6. Арутюнов А. В., Жуков Д. А. Исследование одной линейной задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями // Владикавказский математический журнал. 2010. Т. 12, № 1. С. 3–9. URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/vmj/v12/i1/p3> (дата обращения: 10.05.2022).
7. Longla M. Pontryagin's Principle of Maximum for Linear Optimal Control Problems with Phase Constraints in Infinite Dimensional Spaces // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. 2008. Issue 4. P. 5–19. URL: <https://journals.rudn.ru/miph/article/view/8586> (дата обращения: 10.05.2022).
8. Bergounioux M., Bourdin L. Pontryagin Maximum Principle for General Caputo Fractional Optimal Control Problems with Bolza Cost and Terminal Constraints // ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations. 2020. Vol. 26. P. 38. doi: <https://doi.org/10.1051/cocv/2019021>
9. Smith S., Mayne D. Q. Exact Penalty Algorithm for Optimal Control Problems with Control and Terminal Constraints // International Journal of Control. 1988. Vol. 48, Issue 1. P. 257–271. doi: <https://doi.org/10.1080/00207178808906173>
10. Gugat M., Zuazua E. Exact Penalization of Terminal Constraints for Optimal Control Problems // Optimal Control Applications and Methods. 2016. Vol. 37, Issue 6. P. 1329–1354. doi: <https://doi.org/10.1002/oca.2238>
11. Gao X., Zhang X., Wang Y. A Simple Exact Penalty Function Method for Optimal Control Problem with Continuous Inequality Constraints [Электронный ресурс] // Abstract and Applied Analysis. 2014. Vol. 2014. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/752854>
12. Malisani P., Chaplais F., Petit N. An Interior Penalty Method for Optimal Control Problems with State and Input Constraints of Nonlinear Systems // Optimal Control Applications and Methods. 2014. Vol. 37, Issue 1. P. 3–33. doi: <https://doi.org/10.1002/oca.2134>
13. Pan L. P., Teo K. L. Linear-Nonquadratic Optimal Control Problems with Terminal Inequality Constraints // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 1997. Vol. 212, Issue 1. P. 176–189. doi: <https://doi.org/10.1006/jmaa.1997.5489>

14. Duan Y. Application of Penalty Function Method and the Conjugate Gradient Method in Economic Scheduling of Cascade Hydropower Stations // IFAC Proceedings Volumes. 1986. Vol. 19, Issue 10. P. 227–232. doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)59671-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)59671-8)
15. An Exact Penalty Method for Free Terminal Time Optimal Control Problem with Continuous Inequality Constraints / C. Jiang [et. al.] // Journal of Optimization Theory and Applications. 2012. Vol. 154. P. 30–53. doi: <https://doi.org/10.1007/s10957-012-0006-9>
16. Biegler L. T. Integrated Optimization Strategies for Dynamic Process Operations // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. Vol. 51, Issue 6. P. 910–927. doi: <https://doi.org/10.1134/S004057951706001X>
17. Optimized Choice of Parameters in Interiorpoint Methods for Linear Programming / L.-R. Santos [et. al.] // Computational Optimization and Applications. 2019. Vol. 73. P. 535–574. doi: <https://doi.org/10.1007/s10589-019-00079-9>
18. Карпенко А. П., Щербакова Н. О., Буланов В. А. Гибридный алгоритм глобальной оптимизации на основе алгоритмов искусственной иммунной системы и роя частиц // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 3. С. 255–274. URL: <https://clck.ru/uwmDo> (дата обращения: 10.05.2022).
19. Wei Y. H., Wang J. Z. An Artificial Immune System Approach to Business Process Mining // AMR. 2012. Vol. 472–475. P. 35–38. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.35>
20. Search for the Optimal Ratio of the Initial Substances of a Chemical Reaction Based on Evolutionary Calculations / S. Mustafina [et. al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15, Issue 1. P. 56–60. URL: [http://www.arpnjournals.org/jeas/research\\_papers/rp\\_2020/jeas\\_0120\\_8067.pdf](http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0120_8067.pdf) (дата обращения: 10.05.2022).
21. Михерский Р. М. Применение искусственной иммунной системы для распознавания зрительных образов // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 1. С. 113–117. doi: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-1-113-117>
22. Самигулина Г. А. Разработка интеллектуальных экспертных систем прогнозирования и управления на основе искусственных иммунных систем // Теоретическая информатика. 2009. Вып. 4. С. 15–22. URL: <https://clck.ru/uvy6P> (дата обращения: 10.05.2022).
23. Бардачев Ю. Н., Дидык А. А. Использование положений теории опасности в искусственных иммунных системах // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. 2007. № 2. С. 107–111. URL: <https://aaecs.org/bardachev-yun-didik-aa-ispolzovanie-polojenii-teorii-opasnosti-v-iskusstvennih-immunnih-sistemah.html> (дата обращения: 10.05.2022).
24. Artificial Immune Systems Optimization Approach for Multiobjective Distribution System Reconfiguration / F. R. Alonso [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. 2015. Vol. 30, Issue 2. P. 840–847. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2330628>
25. Антипина Е. В., Мустафина С. А., Антипин А. Ф. Поиск оптимальных режимных параметров каталитического процесса на основе эволюционных вычислений // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56, № 2. С. 158–166. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=toht&y=2022&v=56&n=2&a=TOHT2202003Antipina> (дата обращения: 10.05.2022).
26. Clonal Optimization-Based Negative Selection Algorithm with Applications in Motor Fault Detection / X. Z. Gao [et. al.] // Neural Computing and Applications. 2009. Vol. 18, Issue 7. P. 719–729. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-009-0276-9>
27. Antipina E. V., Mustafina S. A., Antipin A. F. Algorithm of Solving a Multiobjective Optimization Problem on the Basis of a Kinetic Chemical Reaction Model // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2021. Vol. 57, Issue 6. P. 668–674. URL: [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=202202234405460173](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202202234405460173) (дата обращения: 10.05.2022).
28. Антипина Е. В., Антипин А. Ф. Алгоритм расчета оптимальных начальных концентраций веществ химических реакций // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 13. С. 84–87. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29745220> (дата обращения: 10.05.2022).

*Поступила 06.06.2022; одобрена после рецензирования 05.07.2022; принята к публикации 20.07.2022*

*Об авторах:*

**Антипина Евгения Викторовна**, младший научный сотрудник научно-инновационного управления Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета (453103, Российская Федерация, г. Стерлитамак, пр. Ленина, д. 49), кандидат физико-математических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8458-9638>, Researcher ID: AAG-2956-2021, [stepashinaev@ya.ru](mailto:stepashinaev@ya.ru)

**Мустафина Светлана Анатольевна**, проректор по научной и инновационной работе, заведующий кафедрой математического моделирования Башкирского государственного университета (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6363-1665>, [mustafina\\_sa@mail.ru](mailto:mustafina_sa@mail.ru)

**Антипин Андрей Федорович**, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета (453103, Российская Федерация, г. Стерлитамак, пр. Ленина, д. 49), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9151-4167>, [andrejantipin@ya.ru](mailto:andrejantipin@ya.ru)

**Морозкин Николай Данилович**, президент Башкирского государственного университета (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), доктор физико-математических наук, профессор, [morozkinnd@mail.ru](mailto:morozkinnd@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Е. В. Антипина – постановка цели исследования, разработка алгоритма, подготовка текста, формирование выводов.

С. А. Мустафина – научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

А. Ф. Антипин – анализ литературных данных, разработка программного обеспечения, проведение расчетов.

Н. Д. Морозкин – корректировка литературного анализа, доработка текста, корректировка выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Antipina Ye.V., Mustafina S.I., Antipin A.F., Mustafina S.A. Numerical Algorithm for Solving the Optimal Control Problem with Terminal Constraints for Dynamical Systems. *Avtometriya*. 2020;56(6):132–140. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15372/AUT20200615>
2. Gornov A.Yu. Algorithms for Optimal Control Problems with Terminal Restrictions. *Computational Technologies*. 2008;13(4):44–50. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11913113> (accessed 10.05.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Benita F., Mehliiz P. Optimal Control Problems with Terminal Complementarity Constraints. *SIAM Journal on Optimization*. 2018;28(4):3079–3104. doi: <https://doi.org/10.1137/16M107637X>
4. Iori T., Kawano Yu., Ohtsuka T. Algebraic Approach to Nonlinear Optimal Control Problems with Terminal Constraints: Sufficient Conditions for Existence of Algebraic Solutions. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*. 2018;11(3):198–206. doi: <https://doi.org/10.9746/jcmsi.11.198>
5. Karamzin D.Yu. A Pontryagin Maximum Principle for State Constrained Optimal Control Problem under Weakened Controllability Hypothesis. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem*. 2018;(20):46–61. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36422015> (accessed 10.05.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Arutyunov A.V., Zhukov D.A. Investigation of a Linear Optimal Control Problem with State Constraints. *Vladikavkazskiy matematicheskiy zhurnal*. 2010;12(1):3–9. Available at: <http://mi.mathnet.ru/rus/vmj/v12/i1/p3> (accessed 10.05.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Longla M. Pontryagin's Principle of Maximum for Linear Optimal Control Problems with Phase Constraints in Infinite Dimensional Spaces. *Discrete and Continuous Models and Applied*

*Computational Science*. 2008;(4):5–19. Available at: <https://journals.rudn.ru/miph/article/view/8586> (accessed 10.05.2022).

8. Bergounioux M., Bourdin L. Pontryagin Maximum Principle for General Caputo Fractional Optimal Control Problems with Bolza Cost and Terminal Constraints. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*. 2020;26:38. doi: <https://doi.org/10.1051/cocv/2019021>

9. Smith S., Mayne D.Q. Exact Penalty Algorithm for Optimal Control Problems with Control and Terminal Constraints. *International Journal of Control*. 1988;48(1):257–271. doi: <https://doi.org/10.1080/00207178808906173>

10. Gugat M., Zuazua E. Exact Penalization of Terminal Constraints for Optimal Control Problems. *Optimal Control Applications and Methods*. 2016;37(6):1329–1354. doi: <https://doi.org/10.1002/oca.2238>

11. Gao X., Zhang X., Wang Y. A Simple Exact Penalty Function Method for Optimal Control Problem with Continuous Inequality Constraints. *Abstract and Applied Analysis*. 2014;2014. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/752854>

12. Malisani P., Chaplais F., Petit N. An Interior Penalty Method for Optimal Control Problems with State and Input Constraints of Nonlinear Systems. *Optimal Control Applications and Methods*. 2014;37(1):3–33. doi: <https://doi.org/10.1002/oca.2134>

13. Pan L.P., Teo K.L. Linear-Nonquadratic Optimal Control Problems with Terminal Inequality Constraints. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 1997;212(1):176–189. doi: <https://doi.org/10.1006/jmaa.1997.5489>

14. Duan Y. Application of Penalty Function Method and the Conjugate Gradient Method in Economic Scheduling of Cascade Hydropower Stations. *IFAC Proceedings Volumes*. 1986;19(10):227–232. doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)59671-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)59671-8)

15. Jiang C., Lin Q., Yu C., et al. An Exact Penalty Method for Free Terminal Time Optimal Control Problem with Continuous Inequality Constraints. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2012;154:30–53. doi: <https://doi.org/10.1007/s10957-012-0006-9>

16. Biegler L.T. Integrated Optimization Strategies for Dynamic Process Operations. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017;51(6):910–927. doi: <https://doi.org/10.1134/S004057951706001X>

17. Santos L.-R., Villas-Bôas F., Oliveira A.R.L., Perin C. Optimized Choice of Parameters in Interior-point Methods for Linear Programming. *Computational Optimization and Applications*. 2019;73:535–574. doi: <https://doi.org/10.1007/s10589-019-00079-9>

18. Karpenko A.P., Shcherbakova N.O., Bulanov V.A. [A Hybrid Global Optimization Algorithm Based on Artificial Immune System and Particle Swarm Algorithms]. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*. 2014;(3):255–274. URL: <https://clck.ru/uwmDo> (accessed 10.05.2022). (In Russ.)

19. Wei Y.H., Wang J.Z. An Artificial Immune System Approach to Business Process Mining. *AMR*. 2012;472–475:35–38. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.35>

20. Mustafina S., Antipin A., Antipina E., et al. Search for the Optimal Ratio of the Initial Substances of a Chemical Reaction Based on Evolutionary Calculations. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020;15(1):56–60. Available at: [http://www.arpnjournals.org/jeas/research\\_papers/rp\\_2020/jeas\\_0120\\_8067.pdf](http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0120_8067.pdf) (accessed 10.05.2022).

21. Mikherskiy R.M. Application of an Artificial Immune System for Visual Pattern Recognition. *Computer Optics*. 2018;42(1):113–117. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-1-113-117>

22. Samigulina G.A. [Development of Intelligent Expert Forecasting and Control Systems Based on Artificial Immune Systems]. *Teoreticheskaya informatika*. 2009;(4):15–22. Available at: <https://clck.ru/uvy6P> (accessed 10.05.2022). (In Russ.)

23. Bardachev Yu.N., Didyk A.A. [Use of Hazard Theory in Artificial Immune Systems]. *Avtomatika, avtomatizatsiya, elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy*. 2007;(2):107–111. Available at: <https://aaccs.org/bardachev-yun-didik-aa-ispolzovanie-polojenii-teorii-opasnosti-v-iskusstvennih-immunnih-sistemah.html> (accessed 10.05.2022). (In Russ.)

24. Alonso F.R., Oliveira D.Q., Zambroni de Souza A.C., et al. Artificial Immune Systems Optimization Approach for Multiobjective Distribution System Reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015;30(2):840–847. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2330628>

25. Antipina Ye.V., Mustafina S.A., Antipin A.F. [Search for Optimal Regime Parameters of Catalytic Process Based on Evolutionary Calculations]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*. 2022;56(2):158–166. Available at: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=toht&y=2022&v=56&n=2&a=ТОИТ2202003Antipina> (accessed 10.05.2022). (In Russ.)

26. Gao X.Z., Ovaska S.J., Wang X., Chow M.-Y. Clonal Optimization-Based Negative Selection Algorithm with Applications in Motor Fault Detection. *Neural Computing and Applications*. 2009;18(7):719–729. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-009-0276-9>

27. Antipina E.V., Mustafina S.A., Antipin A.F. Algorithm of Solving a Multiobjective Optimization Problem on the Basis of a Kinetic Chemical Reaction Model. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2021;57(6):668–674. Available at: [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=202202234405460173](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202202234405460173) (accessed 10.05.2022).

28. Antipina Ye.V., Antipin A.F. [Algorithm for Calculating the Optimal Initial Concentrations of Chemical Reactions Substances]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2017;20(13):84–87. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29745220> (accessed 10.05.2022). (In Russ.)

*Submitted 06.06.2022; approved after reviewing 05.07.2022; accepted for publication 20.07.2022*

*About the authors:*

**Evgeniya V. Antipina**, Junior Researcher of the Science and Innovation Department, Sterlitamak Branch of Bashkir State University (49 Prospekt Lenina, Sterlitamak 453103, Russian Federation), Cand.Sci. (Phys.-Math.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8458-9638>, Researcher ID: [AAG-2956-2021](https://orcid.org/0000-0002-8458-9638), [stepashinaev@ya.ru](mailto:stepashinaev@ya.ru)

**Svetlana A. Mustafina**, Vice-Rector for Science and Innovation, Head of the Chair of Mathematical Modeling, Bashkir State University (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6363-1665>, [mustafina\\_sa@mail.ru](mailto:mustafina_sa@mail.ru)

**Andrey F. Antipin**, Associate Professor, Department of Applied Computer Science and Programming, Sterlitamak Branch of Bashkir State University (49 Prospekt Lenina, Sterlitamak 453103, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9151-4167>, [andrejantipin@ya.ru](mailto:andrejantipin@ya.ru)

**Nikolay D. Morozkin**, President of Bashkir State University (32 Zaki Validi St., Ufa 450076, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, [morozkinnd@mail.ru](mailto:morozkinnd@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

E. V. Antipina – setting the research goal, developing the algorithm, writing the text, drawing the conclusions.

S. A. Mustafina – scientific guidance, analyzing the research results, revising the text, correcting the conclusions.

A. F. Antipin – analyzing the literary data, developing the software, calculations.

N. D. Morozkin – correcting the literary analysis, revising the text, correcting the conclusions.

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

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 542.467

doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.423-436

Original article



## Flow Boiling Heat Transfer of Grooved Copper Foam with Open Gap

D. Zhang<sup>a</sup>✉, L. Sun<sup>a</sup>, J. Mao<sup>a</sup>, Q. Lei<sup>a</sup>, D. Chen<sup>a</sup>, A. P. Levstev<sup>b</sup><sup>a</sup> Jiangsu University of Science and Technology (Zhenjiang, China)<sup>b</sup> National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)✉ [dhzhang20@126.com](mailto:dhzhang20@126.com)

### Abstract

**Introduction.** Copper foam material has various advantages. It has been proved effective in enhanced boiling heat transfer, but also increases pump power consumption. Grooved copper foam is a solution to achieve good balance between boiling heat transfer characteristics and pump power consumption.

**Material and Methods.** Grooveless and grooved copper foam in open space was studied. Copper foam specifications comprised the combination of porosities of 70, 80 and 90%, and pore densities of 90 and 110 PPI. The grooved copper foams have two specifications: 11 and 17 grooves. The corresponding rib widths are 2 and 1 mm, with groove depth 2.9 mm and width 0.6 mm. The flow boiling experimental system of copper foam sample includes four parts: a heating water reservoir, pump, a test section, and a data acquisition system. In the test section, liquid water turns into vapor and carries the heat away from a copper block surface, and then vapor condenses into liquid water in the terminal reservoir.

**Results.** Grooved copper foam samples presented significantly higher efficiency than grooveless ones. Grooved copper foams can increase the critical heat flux and heat transfer coefficient, compared with grooveless ones. Seventeen-grooved samples showed more excellent performance than 11-grooved ones. Visual observation disclosed that the stratified flow pattern dominated in moderate and high heat flux for grooved copper foam with open space. Covering vapor mass was more effective to be formed above 17-grooved samples, compared with 11-grooved ones. It indicated more vigorous boiling behavior occurs in 17-grooved sample.

**Discussion and Conclusion.** The number of grooves has a significant impact on boiling heat transfer. Grooved copper foam samples present a significantly higher critical heat flux and heat transfer coefficient. Structural parameters such as porosity and pore density, play a relatively secondly role in heat transfer argumentation. Visual observation shows there exists a cyclic alternation of flow patterns: bubbly flow, annular flow and mass vapor

© Zhang D., Sun L., Mao J., Lei Q., Chen D., Levstev A. P., 2022

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

formation for grooved samples. Forming vapor mass is more effective to be formed in 17-grooved samples, compared to 11-grooved ones. It indicates more vigorous boiling behavior occurs in 17-grooved samples.

**Keywords:** copper foam, boiling heat transfer, bubbling dynamics, flow pattern, heat transfer enhancement

**Funding:** We gratefully acknowledge the financial support of Sino-Russian Joint Laboratory Project.

**Conflict of interest:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

**For citation:** Zhang D., Sun L., Mao J., et al. Flow Boiling Heat Transfer of Grooved Copper Foam with Open Gap. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):423–436. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.423-436>

Научная статья

## Теплопередача кипящего потока в слое рифленого медного пеноматериала с открытыми порами

Д. Чжань<sup>1</sup>✉, Л. Сунь<sup>1</sup>, Ц. Мао<sup>1</sup>, Ц. Лей<sup>1</sup>, Д. Чжень<sup>1</sup>,  
А. П. Левцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Цзянсукий университет науки и технологии  
(г. Чжэньцзян, Китай)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет  
(г. Саранск, Российская Федерация)

✉ [dhzhang20@126.com](mailto:dhzhang20@126.com)

### Аннотация

**Введение.** Медный пеноматериал обладает рядом преимуществ. Доказано, что он улучшает теплопередачу при кипении, но увеличивает энергозатраты насоса. Рифленая медная пена позволит достичь оптимального баланса между характеристиками теплопередачи при кипении и потребляемой мощностью насоса.

**Материалы и методы.** Исследован обычный медный пеноматериал и рифленый. Технические характеристики медного пеноматериала представлены комбинациями с пористостью 70, 80 и 90 % и плотностью пор 90 и 110 PPI. Рифленый медный материал имеет 11 и 17 канавок. Соответственно, ширина ребер составляет 2 и 1 мм при глубине канавок 2,9 мм и ширине 0,6 мм. Экспериментальная установка проточного кипения воды в слое пеноматериала состоит из четырех частей: резервуар для нагреваемой воды, насос, испытательная секция и система сбора данных. В испытательной секции жидкая вода превращается в пар и отводит тепло от поверхности медного блока, а затем пар конденсируется в жидкую воду в конечном резервуаре.

**Результаты исследования.** Образцы рифленого медного пеноматериала показали более высокую эффективность, чем образцы обычного. Медный рифленый пеноматериал может повысить критический тепловой поток и коэффициент теплопередачи по сравнению с обычным пеноматериалом. Образцы с 17 канавками показали более высокие показатели, чем образцы с 11 канавками. Визуальное наблюдение показало, что при умеренном и высоком тепловом потоке для рифленого медного пеноматериала с открытыми порами преобладает сложная структура потока. Масса пузырьков пара лучше формировалась над образцами с 17 канавками по сравнению с образцами с 11 канавками. Следовательно, в образце с 17 канавками более интенсивное кипение.

*Обсуждение и заключение.* Количество канавок оказывает существенное влияние на теплопередачу при кипении. Образцы медного рифленого пеноматериала обладают более высоким коэффициентом теплопередачи и критическим тепловым потоком. Структурные параметры, такие как пористость и плотность, оказывают второстепенное влияние на теплопередачу. Визуальное наблюдение показывает, что осуществляется циклическое чередование режимов потока: пузырьковый поток, кольцевой поток и массовое образование пара для образцов с канавками. Большая масса пара образуется на образцах с 17 канавками из-за более интенсивного кипения.

**Ключевые слова:** медный пеноматериал, теплопередача при кипении, динамика барботажа, схема течения, улучшение теплопередачи

**Финансирование:** мы благодарим за финансовую поддержку китайско-российский совместный лабораторный проект.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

**Для цитирования:** Теплопередача кипящего потока в слое рифленого медного пеноматериала с открытыми порами / Д. Чжань [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 423–436. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.423-436>

## Introduction

Now electronic devices are presenting great challenges for the thermal design. The heat flux for electronic chips has out-reached  $200 \text{ W/cm}^2$  in the future. Copper foam has attracted much attention in recent years due to several advantages: very large surface to volume ratio, high thermal conductivity, and high interfacial heat transfer coefficient [1; 2]. It has been proved an effective material for enhanced convective heat transfer. Phase-change heat transfer is a kind of heat dissipation method suitable for high-power electronic equipment. It takes away the heat of electronic equipment through the boiling heat transfer process of liquid working fluid, showing good heat dissipation potential. Copper foam material can further enhance boiling heat transfer, which has been confirmed in some studies, but also brings about additional flow resistance loss, resulting in an increase in pump power consumption [3; 4]. Grooved copper foam is a solution to achieve good balance between boiling heat transfer characteristics and pump power consumption.

## Literature Review

Y. Yang, X. Ji, J. Xu et al. investigated thicknesses effect on pool boiling heat transfer using water as working fluid [5; 6].

Compared with the smooth surface, copper foam could reduce the wall superheat at the ONB point, and present 2–3 times in heat transfer coefficient (HTC) than the smooth surface. They demonstrated that there existed optimum pore density and thickness (60 PPI and 4 mm). A. Kouidri studied boiling heat transfer and flow resistance of organic working fluids in metalfoam-filled tubes [7]. Copper foam and nickel foam alloy (porosity is 20%) were applied. In the flow range tested, copper foam could improve the heat transfer coefficient by 1.3 ~ 3.0 times, but it also increases the pressure drop by 42%. The nickel-alloy foam could not achieve favorable enhancement. The authors proposed a novel bi-porous mini channel heat sink sintered with copper woven tape, composed of two kinds of pore structures: cavities formed by copper strands and crevices formed by copper wires [8]. Experimental results showed that bubble nucleation sites were mainly generated from the cavities between copper strands. Bi-porous mini channel presented 1.37 times in HTC higher than that of the traditional channel. J. Shi et al. explored the wettability effect of metal foam on the pool boiling process [9; 10]. Results showed that

the super-hydrophilic sample achieves better boiling heat transfer performance in medium- or high-heat flux region ( $q \geq 20 \text{ W/cm}^2$ ), while super-hydrophobic copper foam surface shows a better performance in low heat flux region. L. Manetti et al. studied the pool boiling heat transfer enhancement of copper foams with different thicknesses (1, 2, 3 mm), using HFE-7100 as working fluid [11]. The HTC of copper foam was significantly improved. When the heat flux is higher than  $20 \text{ W/cm}^2$ , the copper foam with 1 mm thickness showed the best augmenting effect, 145% higher than that of the copper plate surface. Z. G. Xu and C. Y. Zhao studied the effect of thickness of deionized water on boiling heat transfer performance of V-groove horizontal copper foam pool [12]. V-shaped grooves use capillary action and separate vapor-liquid flow path to reduce the flow resistance of escaping vapor bubbles by supplying liquid, and the existence of enough groove structures increases the critical heat flux.

From the current progress, researches on boiling heat transfer enhancement of copper foam were mainly concentrated in the field of pool boiling, and less studies on flow boiling. In the liquid cooling application, introduction of copper foam may greatly increase the flow resistance compared with the empty channel, resulting in an increase in pump power

consumption. The groove structure of copper foam can mitigate the contradiction between these two [13; 14]. On one hand, processed grooves can reduce the flow resistance; on the other hand, it can also help the smooth separation of bubble from liquid and improve the critical heat flux (CHF).

The main objective of this paper is to investigate the effects of grooves number and structural parameters on flow boiling heat transfer for copper foam samples. The experiments were carried out, with deionized water as working fluid. The mechanism of enhanced heat transfer of copper foam was analyzed by visualization.

## Materials and Methods

### Materials

In order to understand the effect of copper foam parameters on heat transfer performance, three groups of porosity samples were studied, which were 70, 80 and 90%, respectively. Each group contains two kinds of pore densities: 90 and 110 PPI. Figure 1 shows copper foam samples without groove (a) and with groove (b). The size of copper foam sample is 28 mm (length)  $\times$  28 mm (width)  $\times$  2 mm (thickness). The grooved copper foams have two specifications: 11 and 17 grooves. The groove is processed by wire cutting method. The corresponding rib widths are 2 and 1 mm, with groove depth 2.9 mm and width 0.6 mm, shown in Figure 2.



a)



b)

Fig. 1. Schematic diagram of channel distribution of copper foam samples: a) grooveless sample; b) grooved sample

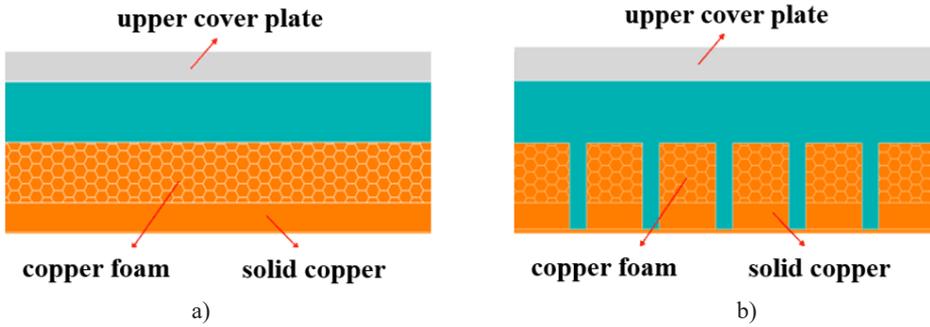


Fig. 2. Cross section diagram of grooveless and grooved copper foam samples

*Experimental system*

The flow boiling experimental system of copper foam sample is shown in Figure 2, including four parts: heating water tank, pump, test section, and data acquisition system. The deionized and degassed water is heated to the experimental setting temperature. It is driven, by a micro gear pump, into the test section. Flow boiling process occurs in the copper foam sample. In the test section, liquid water is transformed into vapor and removes heat from the copper block surface. Subsequently, the vapor is condensed into liquid water in the terminal reservoir. The heating copper module includes a copper block and six heating electric rods, regulated by a DC power. The pressure difference between the inlet and outlet of the heat sink is monitored by a differential pressure sensor.

The inlet and outlet fluid temperatures are measured by two PT100 thermocouples. Five T-type thermocouples are used in measuring wall temperature distribution. The measurement data is converted by the NI acquisition card and entered into the computer for real-time display.

Copper foam heat sink is the core part of the experimental system. As shown in Figure 3, the heat sink is composed of upper cover plate, enclosure structure, heated copper block and glass fiber base. Such a design could ensure most of the input heat transferred to deionized water. The upper cover plate is made of PC plate and the enclosure structure is made of PEEK material. The copper foam sample is welded on the top of the heating copper block. The O-type sealing rubber was adopted to ensure no leakage.

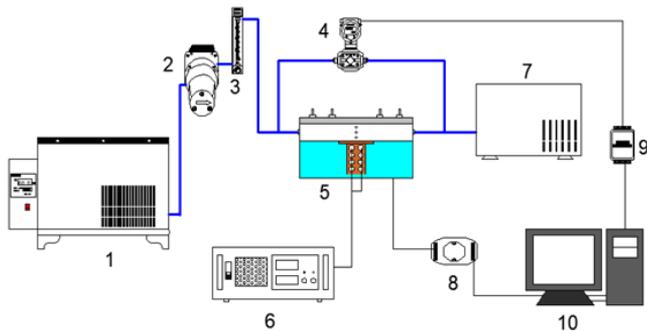


Fig. 3. System diagram: 1 – thermostatic water tank; 2 – micro gear pump; 3 – flowmeter; 4 – differential pressure sensor; 5 – heat sink; 6 – DC power supply; 7 – water reservoir; 8 – NI acquisition card; 9 – temperature converter; 10 – computer

*Data processing and error analysis*  
 Effective heat flux:

$$q_{eff} = q_{total} - q_{loss}, \quad (1)$$

where  $q_{total}$  is the total input heating power;  $q_{loss}$  is the heat loss between heat sink and environment. Boiling heat transfer coefficient is as follows:

$$h = \frac{q_{eff}}{T_w - T_{sat}}, \quad (2)$$

where  $T_w$  is the average surface wall temperature, K;  $T_{sat}$  is the saturation temperature of the working fluid, K;  $T_w$  is extrapolated from the temperature of the uppermost thermocouple point, assuming one-dimensional heat conduction [15]. The saturated pressure is derived by the linear interpolation method in terms of inlet and outlet pressure at each inputting heat flux. The corresponding saturation temperature  $T_{sat}$  is then figured out.

Mass flux:

$$G = \frac{\rho_l q_v}{A_{ch}}, \quad (3)$$

where  $G$  is the mass flux, kg/m<sup>2</sup>·s;  $q_v$  is volume flow, L/h;  $A_{ch}$  is the cross-sectional area of the sample, m<sup>2</sup>.

According to previous researches, it was found that the heat loss of the heat sink was related to the temperature difference between copper block and environment. It is found that there is a linear relationship between the two. Extrapolation method from single-phase measurement is to estimate the heat loss of two-phase process. The linear function was regressed in Figure 4 in the mass flux of 18.6 kg/m<sup>2</sup>·s.

The uncertainties of flow rate, pressure of inlet and outlet, input heat power are  $\pm 4$ ,  $\pm 0.25$  and  $\pm 0.5\%$ , respectively. The fluid temperatures of inlet and outlet are measured by two thermal resistance sensors (PT100) with uncertainties of  $\pm 0.3$  K. Three thermocouples, used in copper surface temperature measurement, had an uncertainty of  $\pm 0.5$  K after calibrated.

### Results

In the experiment, deionized and degassed water was used as the working fluid, the inlet temperature was 60 °C, and the mass fluxes were 9.3, 18.5 and 27.8 kg/(m<sup>2</sup>·s). The study investigated the boiling heat transfer performance of grooveless and grooved copper foam samples. Structural parameters effect, porosity and pore density, were also explored. In the test section, there exists an open gap with a height of 2 mm above the copper foam sample.

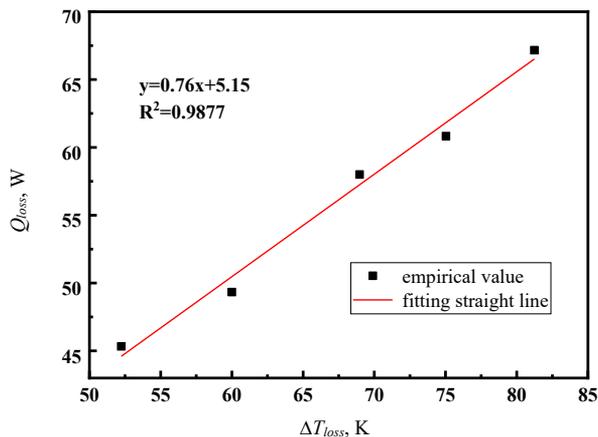


Fig. 4. Fitting line of heat loss and temperature difference

*Effect of groove number on heat transfer performance*

The groove number effects on boiling curves are shown in Figure 5a. Copper foam samples with 90% and 90 PPI were selected. Boiling phenomenon in grooved and grooveless copper foam samples are initiated at the superheat of 4–5 K. After initiation, grooved samples present significantly lower wall superheat than grooveless ones. Moreover, grooved samples could achieve 110 W/cm<sup>2</sup> in CHF while grooveless ones only 90 W/cm<sup>2</sup>. When the heat flux is lower than 65 W/cm<sup>2</sup>, two specifications of grooved samples bear the same trends in boiling curves. These two grooved samples begin to differentiate in performance. The 17-grooved sample maintains lower wall superheat degrees than the 11-grooved one. Compared with grooved samples, the boiling curve slope of the grooveless sample is relatively gentle, indicating high operation wall temperature at the same heat flux. It demonstrates that grooved copper foam could greatly enhance the boiling heat transfer performance.

Corresponding HTC curves are displayed in Figure 5b for copper foam samples with 90% and 90 PPI. From Figure 5b, two grooved samples are almost similar in

performance with that of the grooveless sample in the single-phase region. After larger than 10 W/cm<sup>2</sup>, HTC curves of two grooved samples increase more rapidly than the grooveless sample. When the heat flux is larger than 60 W/cm<sup>2</sup>, the HTC curves of 17-grooved samples continue to exhibit an increase trend while that of 11-grooved begins to fall gently. Seventeen-groove copper foam reaches the largest HTC of 100 kW/(m<sup>2</sup>·K) in the heat flux of 123 W/cm<sup>2</sup>, which is three times as large as that of grooveless sample.

For grooved copper foam with open space, the liquid coolant could be sucked into the heating surface from the porous layer and fins. Generated vapor will immediately leave the porous structure and not retard the liquid supply. Gas-liquid separation is achieved in such a grooved structure. Liquid replenishment and vapor discharge are relatively smooth. Owing to this merit, grooved copper foam could significantly promote both HTC and CHF in comparison with grooveless copper foam.

*Effect of structural parameters*

Structural parameters effect, pore density and porosity, are investigated in detail. Figure 6a shows measured boiling curves of 90 PPI samples with different porosity, namely 70, 80 and 90%.

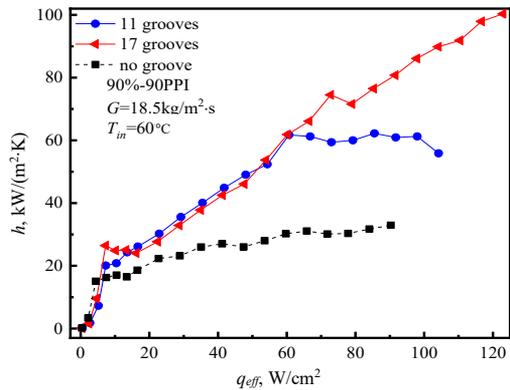
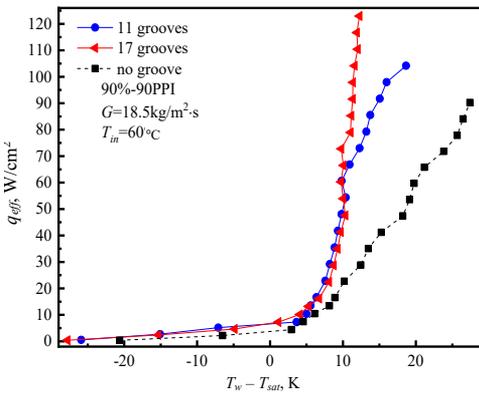


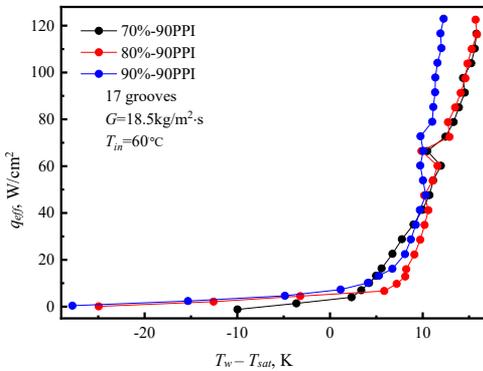
Fig. 5. Boiling curves and HTC curves of grooved and grooveless copper foam samples

Similar boiling curves are observed for three porosities samples. The sample with 70% porosity presents the lowest wall superheat at the heat fluxes of less than 47 W/cm<sup>2</sup>. However, the sample with 90% porosity shows the slightly lowest beyond 47 W/cm<sup>2</sup>. For CHF, three samples could reach 120 W/cm<sup>2</sup> finally.

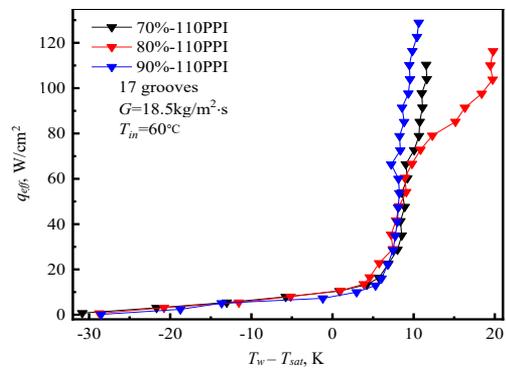
Figure 6b shows the boiling curves of 110 PPI copper foam samples with different porosity. Boiling curves of three samples is similar at  $q \leq 40$  W/cm<sup>2</sup>. When the heat flux is greater than 40 W/cm<sup>2</sup>, the boiling curve of the sample with 90% porosity increases sharply, showing excellent heat transfer performance, and its CHF is 130 W/cm<sup>2</sup>. The copper foam sample with

80% porosity bears highest wall superheat degree and deteriorates beyond 60 W/cm<sup>2</sup>.

Figure 7a illustrates corresponding HTC curves of 90PPI samples. Three curves are almost coincident in the range of 10 ~ 65 W/cm<sup>2</sup>. When the heat flux is greater than 65 W/cm<sup>2</sup>, the HTC of 90% specification increases more rapidly than other two ones. Its HTC can reach 100 kW/(m<sup>2</sup>·K). For 110 PPI samples, corresponding HTC curves of are shown in Figure 7b. Similar to boiling curves, HTC curves of the three samples are almost coincident at  $q \leq 64$  W/cm<sup>2</sup> and then differs. With the increase in heat flux, HTC curves of 70 and 90% continue to rise up, but the HTC of 80% takes on a gradually downward trend.

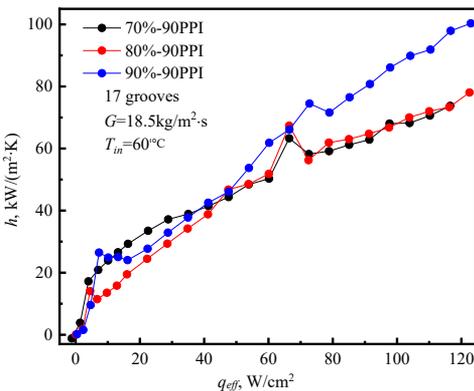


a)

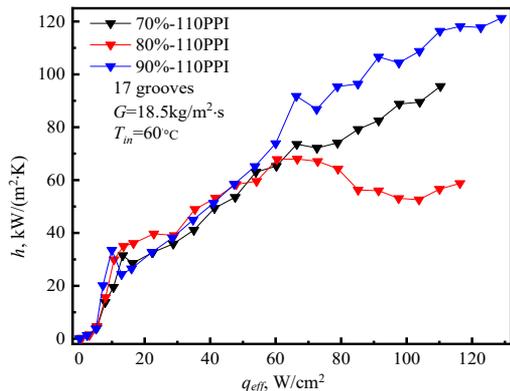


b)

Fig. 6. Boiling curves of grooved copper foam with different porosity



a)



b)

Fig. 7. HTC curves of grooved copper foam with different porosity

The sample of 90% could achieve largest HTC of 121.3 kW/(m<sup>2</sup>·K), twice of 80% sample and far greater than existing literatures.

*Effect of mass flux*

Mass flux influence on flow boiling in grooved copper foam were also studied. Inlet temperature was controlled to 60°C. The 17-groove sample with porosity of 90% and pore densities of 90 PPI was selected.

Figure 8a shows boiling curves at different mass fluxes, namely 9.3, 18.5, 27.8 kg/(m<sup>2</sup>·s). Under low heat fluxes, boiling curves are less affected by the mass flux. It infers that the boiling mechanism is dominated by nucleate boiling. After in medium and high heat flux stage, the mass flux begins to exert an influence on boiling curves. The boiling mechanism switches from nucleate boiling to convection boiling. The wall superheat degree would decrease with the increase in mass flux at the same heat flux. The corresponding heat transfer coefficients are plotted against heat fluxes in Figure 8b. HTC curves show an upward trend under the mass flux of 18.5 and 27.8 kg/(m<sup>2</sup>·s) while HTC curve at  $G = 9.3$  kg/(m<sup>2</sup>·s) shows a trend of increasing first and then decreasing.

*Visualization of grooved copper foam with open gap*

The groove number directly affects the flow pattern after boiling incipience, thus resulting in different heat transfer efficiency. Two samples (90%, 110 PPI) with different groove numbers, 11- and 17-grooved, were selected. The flow patterns of both samples were visualized at different heat flux.

Figure 9 shows the visual images of both of the grooved samples in a low heat flux of 12 W/cm<sup>2</sup>. As shown in Figure 9a, it maintained supercooled liquid state in the upstream section for the 11-grooved sample. Fewer bubbles attached in the wall are observed in the downstream section. Most bubbles could not grow anymore due to low wall superheat. Different from the 11-groove sample, obvious stratification phenomenon is observed in Figure 9b for the 17-groove sample. Many bubbles are generated in the porous wall, and quickly discharge under the action of buoyancy force. The dense bubble layer is formed in the upper cover plate.

As the heat flux is increased to 54 W/cm<sup>2</sup>, both kinds of samples also show great difference. Boiling behaviors of 11-grooved sample are shown in Figure 10a over a period of time. At  $t = 0$  s, the supercooled nuclear boiling occurs in channels. Mainstream liquid contains a large number of small bubbles.

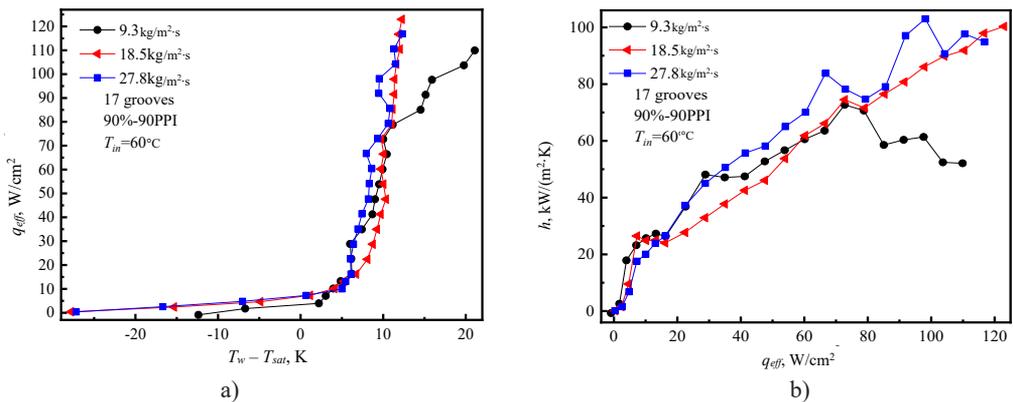


Fig. 8. Boiling curves and HTC curves at different mass fluxes

The flow pattern is dominated by bubbly flow. At  $t = 0.08$  s, annular flow is observed in the downstream section because of coalescence effect (the red coil in the figure).

Boiling behaviors of 17-grooved sample are shown in Figure 10b over a period of time. At  $t = 0$  s, the observed image is analogous to the 11-grooved sample. At  $t = 0.11$  s, a vapor mass is formed in the upstream region. At  $t = 0.97$  s, vapor masses were flushed out of the channel by the mainstream fluid, and its occupied region reduced. There existed a cycle of alternating flow patterns: bubbly flow, annular flow and vapor mass. Such phenomenon presented the periodic characteristics.

When the heat flux continues to increase to  $116.8 \text{ W/cm}^2$ , the 11-groove sample has reached CHF. As shown in Figure 11, at  $t = 0$  s, the vapor mass occupied half of the sample area, and it developed to two thirds area up to  $t = 0.019$  s. The CHF is triggered by large area drought. For the 17-channel sample, the CHF is triggered in a heat flux of  $129 \text{ W/cm}^2$ , which visual image was shown in Figure 12. At  $t = 0$  s, a large vapor mass completely covers the region of one side and results in uneven liquid inflow. After  $0.57$  s, the air mass spreads almost the whole region, only four

channels of one side as liquid inlet. Bubbles are being generated continuously and grew up under the vapor mass. The CHF is also resulted from large area drought.

### Discussion and Conclusion

This work mainly studied boiling heat transfer performance in grooved copper foams. The conclusions are as follows:

1. The groove number has a significant impact on boiling heat transfer. Grooved copper foam samples present significantly higher in enhancement effect than grooveless ones. For grooved copper foam, 17-grooved samples show more superior performance to 11-grooved ones, which could effectively improve CHF and HTC.

2. Compared with groove number effect, porosity and pore density play a relatively minor role in heat transfer argumentation. The copper foam sample with 90% and 110 PPI shows slightly better than other specifications for the grooved samples investigated.

3. Visual observation shows there exists a periodic cycle of alternating flow patterns: bubbly flow, annular flow and vapor mass for grooved samples. Covering vapor mass is more effective to be formed in 17-grooved samples, compared to 11-grooved ones. It indicates more vigorous boiling behavior occurred in the 17-grooved sample.

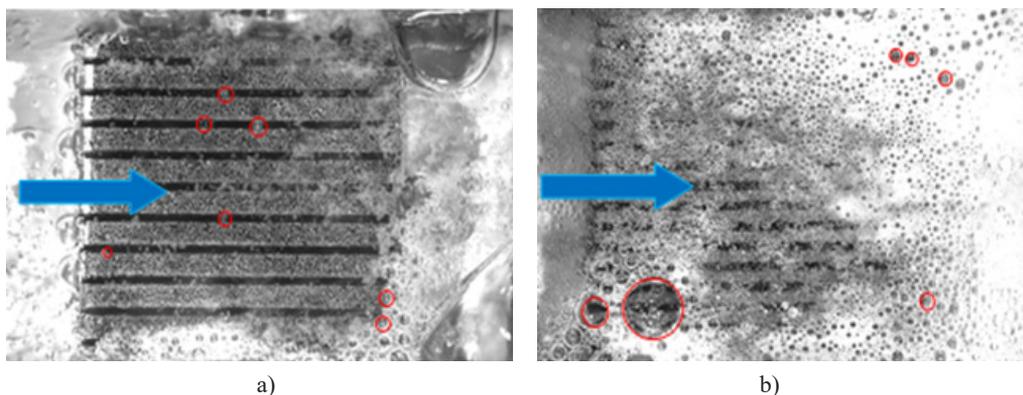
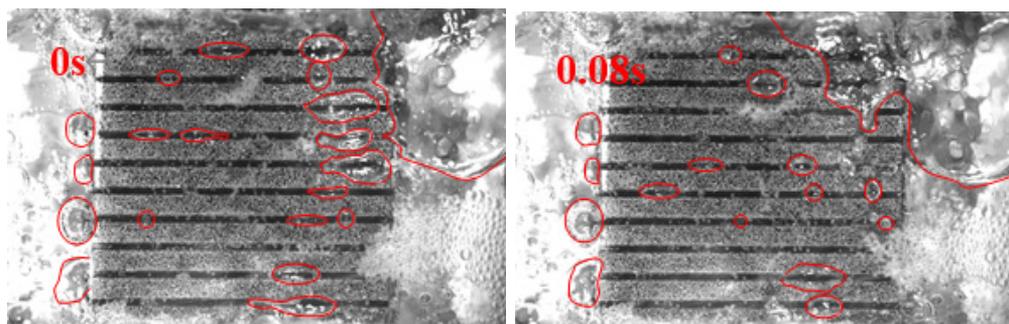
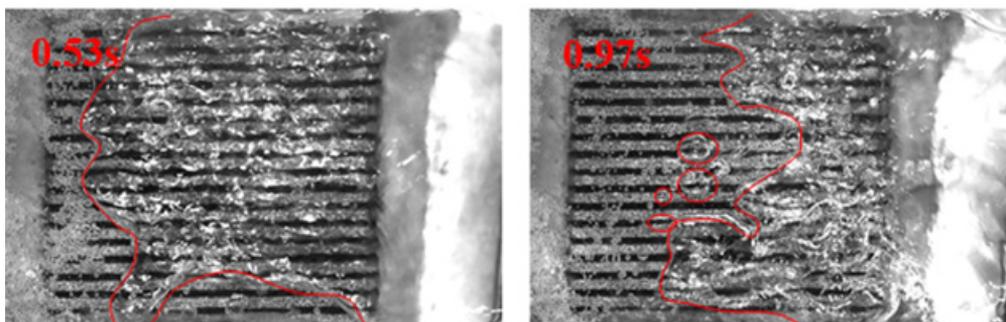
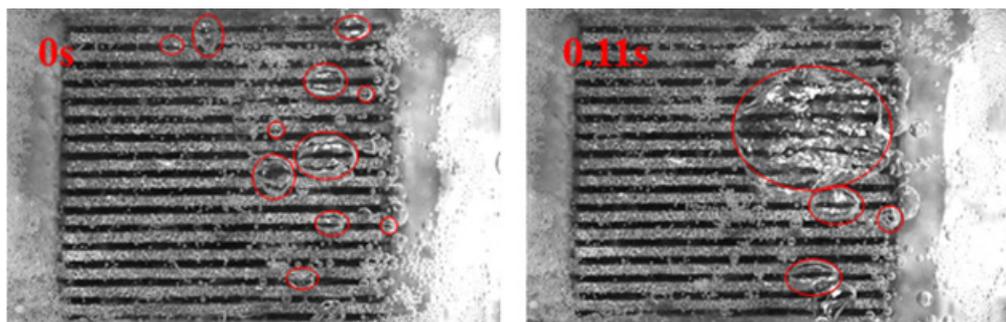


Fig. 9. Visual in the heat flux of  $12 \text{ W/cm}^2$ : a) 11-grooved; b) 17-grooved



a)



b)

Fig. 10. Visual observation in the heat flux of  $54 \text{ W/cm}^2$ : a) 11-grooved sample; b) 17-grooved sample

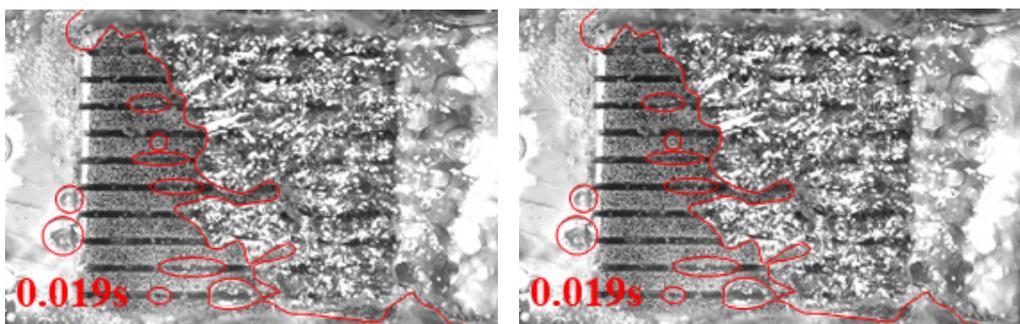


Fig. 11. Visualization at  $q = 116.8 \text{ W/cm}^2$  near CHF for 11-grooved sample

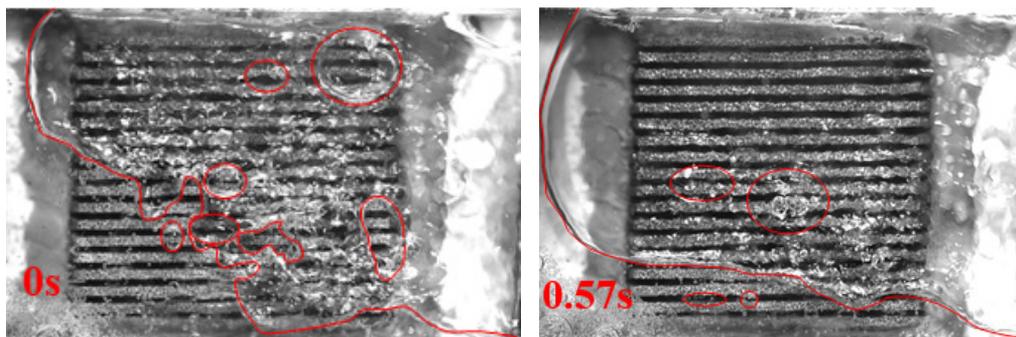


Fig. 12. Visualization at  $q = 129 \text{ W/cm}^2$  near CHF for 17-grooved sample

For the grooved copper foam with open space, the stratified flow pattern dominates in moderate and high heat flux. The CHF mechanism result from large area dry-out induced by continuous covering vapor film.

## REFERENCE

1. Xu Z.G., Zhao C.Y. Experimental Study on Pool Boiling Heat Transfer in Gradient Metal Foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;85:824–829. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.017>
2. Gao W.H., Xu X., Liang X. Flow Boiling of R134a in an Open-Cell Metal Foam Mini-Channel Evaporator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;126(A):103–115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.125>
3. Deng D., Zeng L., Sun W. A Review on Flow Boiling Enhancement and Fabrication of Enhanced Microchannels of Microchannel Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121332>
4. Hong S., Dang C., Hihara E. A 3D Inlet Distributor Employing Copper Foam for Liquid Replenishment and Heat Transfer Enhancement in Microchannel Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119934>
5. Yang Y., Ji X., Xu J. Pool Boiling Heat Transfer on Copper Foam Covers with Water as Working Fluid. *International Journal of Thermal Sciences*. 2010;49(7):1227–1237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.013>
6. Xu J., Ji X., Zhang W., Liu G. Pool Boiling Heat Transfer of Ultra-Light Copper Foam with Open Cells. *International Journal of Multiphase Flow*. 2008;34(11):1008–1022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.05.003>
7. Koudri A., Madani B. Thermal and Hydrodynamic Performance of Flow Boiling Through a Heat Exchanger Filled with Various Metallic Foam Samples. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2017;121:162–169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.08.014>
8. Deng D., Tang Y., Liang D., et al. Flow Boiling Characteristics in Porous Heat Sink with Reentrant Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.057>
9. Shi J., Jia X., Feng D., et al. Wettability Effect on Pool Boiling Heat Transfer Using a Multiscale Copper Foam Surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118726>

10. Shi J., Feng D., Chen Z. Experimental Investigation on Pool Boiling Heat Transfer on Untreated/Super-Hydrophilic Metal Foam under Microgravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119289>

11. Manetti L.L., Moita A.S.O.H., de Souza R.R., et al. Effect of Copper Foam Thickness on Pool Boiling Heat Transfer of HFE-7100. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119547>

12. Xu Z.G., Qu Z.G., Zhao C.Y., et al. Pool Boiling Heat Transfer on Open-Celled Metallic Foam Sintered Surface under Saturation Condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011;54(17–18):3856–3867. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.043>

13. Li H.Y., Leong K.C. Experimental and Numerical Study of Single and Two-Phase Flow and Heat Transfer in Aluminum Foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011;54(23–24):4904–4912. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.002>

14. Tong L., Xiaomin W., Qiang M. Pool Boiling Heat Transfer of R141b on Surfaces Covered Copper Foam with Circular-Shaped Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019;105:136–143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.03.015>

15. Zhang D.H., Xu H., Chen Y., et al. Boiling Heat Transfer Performance of Parallel Porous Microchannels. *Energies*. 2020;13(11). doi: <https://doi.org/10.3390/en13112970>

*Submitted 12.05.2022; approved after reviewing 08.06.2022; accepted for publication 20.06.2022*  
*Поступила 12.05.2022; одобрена после рецензирования 08.06.2022; принята к публикации 20.06.2022*

*About the authors:*

**Donghui Zhang**, Associate Professor in School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology (2 Mengxi Rd, Zhenjiang 212003, China), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7790-2948>, [dhzhang20@126.com](mailto:dhzhang20@126.com)

**Lili Sun**, Postgraduate Student in School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology (2 Mengxi Rd, Zhenjiang 212003, China), [1640880760@qq.com](mailto:1640880760@qq.com)

**Jijin Mao**, Postgraduate Student in School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology (2 Mengxi Rd, Zhenjiang 212003, China), [554436558@qq.com](mailto:554436558@qq.com)

**Qinhui Lei**, Postgraduate Student in School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology (2 Mengxi Rd, Zhenjiang 212003, China), [1287510323@qq.com](mailto:1287510323@qq.com)

**Daifen Chen**, Leading Researcher of Sino-Russian Joint Laboratory Project, Professor in School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology (2 Mengxi Rd, Zhenjiang 212003, China), Ph.D., Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3070-1989>, [dfchen01@163.com](mailto:dfchen01@163.com)

**Alexey P. Levstev**, Leading Researcher of Sino-Russian Joint Laboratory Project, Head of the Chair of Heat and Power Systems of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, Researcher ID: B-8620-2019, [levstevap@mail.ru](mailto:levstevap@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

D. Zhang – analysis of the results, and conclusions.

L. Sun – formulating the research task, conducting experiments.

J. Mao – assistance to conduct experiments.

Q. Lei – cooperation to conduct experiments.

D. Chen – overall design of this research.

A. P. Levstev – overall design of this research.

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

*Об авторах:*

**Чжань Донгхуй**, доцент Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологий (212003, Китай, г. Чжэньцзян, 2 проезд Менгси), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7790-2948>, [dhzhang20@126.com](mailto:dhzhang20@126.com)

**Сунь Лили**, аспирант Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологий (212003, Китай, г. Чжэньцзян, 2 проезд Менгси), [1640880760@qq.com](mailto:1640880760@qq.com)

**Мао Цзинцинь**, аспирант Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологий (212003, Китай, г. Чжэньцзян, 2 проезд Менгси), [554436558@qq.com](mailto:554436558@qq.com)

**Лей Циньхуй**, аспирант Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологий (212003, Китай, г. Чжэньцзян, 2 проезд Менгси), [1287510323@qq.com](mailto:1287510323@qq.com)

**Чжень Дайфен**, ведущий научный сотрудник китайско-российского лабораторного проекта, профессор Школы энергетики Цзянсуского университета науки и технологий (212003, Китай, г. Чжэньцзян, 2 проезд Менгси), Ph.D., профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3070-1989>, [dfchen01@163.com](mailto:dfchen01@163.com)

**Левцев Алексей Павлович**, ведущий научный сотрудник китайско-российского лабораторного проекта, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, Researcher ID: [B-8620-2019](https://orcid.org/0000-0003-2429-6777), [levtzevap@mail.ru](mailto:levtzevap@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Д. Чжань – анализ результатов и выводы.

Л. Сунь – формулирование задачи исследования, проведение экспериментов.

Ц. Мао – участие в проведении экспериментов.

Ц. Лей – сотрудничество в проведении экспериментов.

Д. Чжень – общий замысел исследования.

А. П. Левцев – общий замысел исследования.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



## Автоматизированная система определения координаты поезда с самонастройкой решающей функции

Е. М. Тарасов , А. Е. Тарасова

Самарский государственный университет путей сообщения  
(г. Самара, Российская Федерация)

 [tarasov53em@yandex.ru](mailto:tarasov53em@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Проблема определения координат поезда на участке приближения к переезду сопряжена с воздействием дестабилизирующих факторов на первичный датчик информации – рельсовую линию с распределенными параметрами. Это приводит к ошибке вычисления координат поезда. Цель исследования – разработка и научное обоснование принципа построения системы вычисления координат поезда с самонастройкой решающей функции в условиях воздействия значительных дестабилизирующих факторов на первичный датчик информации.

**Материалы и методы.** Для решения задачи достоверного определения координат поезда в работе предложен двухфазный принцип формирования решающей функции. На первом этапе с помощью обучающей выборки образов, используя принцип обучения, определяется решающая функция (модель) системы вычисления координат поезда. При вступлении поезда на участок приближения фиксированной длины определяется рассогласование сравнением вычисленной координаты с фиксированной. Далее наступает второй этап – самонастройка коэффициентов решающей функции до достижения требуемой точности.

**Результаты исследования.** В статье показаны этапы формирования решающей функции двумерными образами, а также разработан и апробирован алгоритм самонастройки решающей функции при воздействии различных дестабилизирующих факторов. С использованием 6 признаков, составляющих векторов тока и напряжения на входе рельсовой линии, получены 6 решающих функций. В качестве аргументов полиномов в них использованы различные сочетания двумерных образов.

**Обсуждение и заключение.** Результаты исследований подтверждают реализуемость формирования решающей функции и ее самонастройки. Максимальная ошибка вычисления координат у различных сочетаний составляет от 9,97 % (199,34 м) до 4,57 % (91,49 м). Ошибка определения с погрешностью не более 5 % у двух решающих функций удовлетворяет требованиям заблаговременного закрытия переезда, так как в 45-секундном интервале времени для приведения в действие автоматической переездной сигнализации расстояние 100 м преодолевается за 3 секунды, то есть затраченное время составляет всего 3 секунды в 45-секундном интервале.

**Ключевые слова:** рельсовая линия, решающая функция, самонастройка, подстройка, информативные признаки, инвариантность, ошибка вычисления



**Финансирование:** статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы по государственному заданию бюджетным организациям высшего образования, подведомственных Федеральному агентству железнодорожного транспорта (Росжелдор), регистрационный номер 122022200432-8 «Разработка интеллектуальной системы управления транспортными потоками на железнодорожных переездах на основе машинного обучения и непрерывного определения координат поезда с адаптивным самонастраивающимся алгоритмом корректировки уравнения вычисления координаты поезда».

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

**Для цитирования:** Тарасов Е. М., Тарасова А. Е. Автоматизированная система определения координаты поезда с самонастройкой решающей функции // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 437–459. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.437-459>

Original article

## Automated Train Coordinate Determination System with Self-Tuning of the Decision Function

Е. М. Tarasov , А. Е. Tarasova

Samara State Transport University (Samara, Russian Federation)

 [tarasov53em@yandex.ru](mailto:tarasov53em@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** The problem of determining the train coordinates on the approach section to the crossing is associated with the impact of destabilizing factors on the information primary detector – the rail line with distributed parameters. This leads to an error in calculating train coordinates. The aim of the study is to develop and scientifically substantiate the principle of building a system for calculating train coordinates with self-tuning of the decision function under the influence of significant destabilizing factors on the information primary sensor.

**Materials and Methods.** To solve the problem of reliable determination of train coordinates, we propose a two-phase principle for forming the decision function. At the first stage, by means of a training sample of images and using the learning principle, the decision function (model) of the system for calculating train coordinates is determined. When the train enters a fixed-length approach section, the mismatch is determined by comparing the calculated coordinate with the fixed one. The second stage is the self-tuning of the coefficients of the decision function until the required accuracy is achieved.

**Results.** The article shows the stages of forming the decision function by two-dimensional images; there was developed and tested an algorithm for self-tuning of the decision function under the influence of various destabilizing factors. Through using 6 attributes of components of current and voltage vectors at the rail line input, 6 solving functions were obtained. Various combinations of two-dimensional images were used as polynomial arguments.

**Discussion and Conclusion.** The study results confirm the feasibility of forming decision function and its self-tuning. The maximum error in calculating coordinates for various combinations ranges from 9.97% (199.34 m) to 4.57% (91.49 m). The error of determination of 5% for two decisive functions satisfies the safety requirements, since in a 45-second time interval to activate an automatic crossing signal, a distance of 100 m is covered in 3 seconds, i.e. the elapsed time is only 3 seconds in a 45 second interval.

**Keywords:** rail line, decisive function, self-tuning, fine tuning, informative features, invariance, calculation error

**Funding:** The article was prepared as part of the research work on the state assignment of budgetary organizations of higher education subordinate to the Federal Agency for Railway Transport (Roszheldor), registration number 122022200432-8 “Development of an

intelligent system for managing traffic flows at railway crossings based on machine learning and continuous determining train coordinates with an adaptive self-tuning algorithm for correcting the equation for calculating train coordinates”.

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

**For citation:** Tarasov E.M., Tarasova A.E. Automated Train Coordinate Determination System with Self-Tuning of the Decision Function. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):437–459. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.437-459>

## Введение

Эффективность технологических процессов регулирования потоков автотранспорта и поездов на железнодорожных переездах зависит от алгоритма и технических средств управления автоматическими системами ограждения переездов и информирования водителей автотранспорта о подходе поездов, а также о ситуации на переезде. Автоматические переездные сигнализации, используемые на железнодорожном транспорте, являются разомкнутыми системами с жестким алгоритмом функционирования. Суть алгоритма заключается в том, что для контроля приближения поезда к переезду и управления ограждающими устройствами организуются участки фиксации вступления поезда на чувствительный элемент датчика приближения к переезду в виде рельсовых линий ограниченной длины. Длина рельсовой линии участков контроля зависит от времени извещения водителей автотранспорта для гарантированного освобождения переезда и максимальной скорости поездов, обращающихся на участке железной дороги, оборудованном переездом. На практике длина рельсовой линии участка контроля достигает 1,5–2,0 км. При фиксированной длине участка контроля  $l_{\text{уп}}$  фактическое время извещения на переезде обратно пропорционально скорости поезда, приближающегося к переезду, и если скорость поезда низкая, то время извещения значительно превышает оптимальное время закрытого для движения автотранспорта:

$$t_{\text{и}} = \frac{t_{\text{р}}(v_{\text{max}} - v_{\text{т.п.}})}{v_{\text{т.п.}}},$$

где  $t_{\text{р}}$  – расчетное время извещения, с;  $v_{\text{max}}$  – максимальная скорость поездов, обращающихся на участке железной дороги, оборудованном переездом, км/ч;  $v_{\text{т.п.}}$  – текущая скорость поезда, км/ч;  $t_{\text{и}}$  – время извещения, с.

В связи с внедрением длиннооставных и тяжеловесных поездов диапазон фактических скоростей существенно расширяется, и количество поездов, следующих с незначительной скоростью, большое. Поэтому простои автотранспорта у закрытых переездов увеличиваются, что приводит к сокращению пропускной способности переездов для автотранспорта. Излишнее время закрытого состояния переезда без дополнительной информации о приближении поезда приводит к повышению риска возникновения ДТП на переезде, так как у водителей автотранспорта возникает сомнение в исправности автоматических ограждающих устройств на переезде, и они начинают движение, объезжая полущлагбаумы или двигаясь через рельсы.

Повысить пропускную способность переездов возможно разработкой алгоритма формирования постоянного времени извещения о закрытии переезда и управления ограждающими устройствами. Для этого необходима информация о фактической координате и скорости приближающегося к переезду поезда.

Определение координаты приближающегося поезда наиболее эффективно осуществлять с использованием принципов распознавания образов предварительно обученными решающими функциями (РФ) и многомерными образами состояний. При этом в качестве информативных признаков, составляющих образы состояний, удобно использовать измеряемые векторы напряжений и токов на питающем конце рельсовой линии, а в качестве решающих функций – ортогональные полиномы Эрмита, Лаггера, Лежандра, Лорана или степенные полиномы Колмогорова – Габора. Предварительно обученные решающие функции с определенными решающими правилами позволяют обеспечить инвариантность решающей функции к воздействию ограниченного диапазона дестабилизирующих факторов. Ошибка определения координат поезда появляется в случае изменения сверхнормативных значений первичных параметров рельсовой линии как линии с распределенными параметрами. Аналогично ошибка появляется в случае изменения значений полного сопротивления устройств согласования входных и выходных электрических параметров рельсовой линии с параметрами источника сигнала опроса рельсовой линии и входным импедансом классификатора. Это приводит к нарушению алгоритма функционирования автоматической переездной сигнализации из-за появления ошибки определения скорости поезда при постоянстве временных интервалов вследствие ошибочного определения разности координат.

Таким образом, системы автоматического управления потоками автотранспорта и поездов относятся к классу сложных систем с множеством

состояний, функционирующих в условиях неопределенности процесса воздействия дестабилизирующих факторов, показателей качества. Для управления такими системами в настоящее время широко используются адаптивные системы управления с накоплением информации и расчетом некоторого оптимального закона управления (модели) на первой фазе и оперативной корректировки модели в процессе функционирования системы на второй фазе. Первая фаза относится к классу обучающихся систем, а вторая – к классу самонастраивающихся систем. Соответственно, создаваемую систему распознавания координат поезда на участке приближения можно рассматривать как частный случай самонастраивающейся системы с корректировкой модели, в качестве которой предполагается решающая функция.

Цель исследования – разработка и научное обоснование принципа построения системы вычисления координат поезда с самонастройкой решающей функции в условиях воздействия значительных дестабилизирующих факторов на первичный датчик информации.

### **Обзор литературы**

В настоящее время известно много работ, посвященных распознаванию координат поезда на участке приближения к переезду<sup>1</sup> [1–3]. В работах предлагаются разные совокупности информативных признаков в образах, а также разные алгоритмы классификации.

Одной из проблем при функционировании системы управления ограждающими устройствами на переездах является большое время ожидания открытия переезда водителями автотранспорта. Это связано, в первую очередь, с несовершенством алгоритма

<sup>1</sup> Anzai Y. Pattern Recognition and Machine Learning. Amsterdam : Elsevier, 2012. 407 p. URL: <https://www.elsevier.com/books/pattern-recognition-and-machine-learning/anzai/978-0-08-051363-8> (дата обращения: 20.05.2022).

управления переездной сигнализацией и отсутствием информации о координате и скорости поезда. Значительные перерывы времени на пропуск поездов провоцируют нарушения и ДТП на переездах [3; 4].

Повысить эффективность функционирования автоматической переездной сигнализации и сократить ДТП предлагается в других работах с использованием устройства вычисления координаты и скорости поезда на участке приближения [5; 6]. Для этого рельсовая линия рассматривается как линия с равномерно распределенными параметрами, входные и выходные электрические параметры которой зависят от состояния ее первичных параметров и изменяются от воздействия колесных пар поезда. Для разработки математических моделей электрических параметров рельсовых линий их удобно замещать электрической схемой замещения, так как уравнения состояний рельсовых линий достаточно полно описывают взаимосвязь между входными и выходными электрическими параметрами и значениями первичных и вторичных параметров рельсовых линий [7; 8].

Математическим аппаратом, с помощью которого вычисляются координаты приближающегося поезда, являются модели, реализующие принципы распознавания образов с обучающим классификатором состояний<sup>2</sup> [1; 9; 10].

При использовании принципов распознавания образов одним из важных процессов является обучение классификатора. Известны два основных подхода при обучении: обучение с учителем и обучение без учителя. Распознавание состояний рельсовых линий предлагает априорное наличие данных об обучаемых образах, поэтому используется обучение с учителем [10–13]. В настоящее

время известно множество методов обучения: градиентный метод, метод SVM, GMM, Random Forest, XG Boost и другие, отличающиеся сложностью алгоритмов обучения, информативностью, количеством признаков, временем обучения, точностью классификации образов [14–16]. Фундаментальная цель машинного обучения в данной постановке задач распознавания – определение решающей функции, распознающей  $i$ -й образ состояния с заданием определенной точности, а также синтез решающей функции минимальной сложности, отвечающей поставленным требованиям [15; 17–19].

Результатом машинного обучения является формирование решающей функции вычислителя координат поезда [19; 20]. Решающая функция, обученная по выборке, составленной из образов с нормативными первичными параметрами рельсовых линий и параметров согласующих устройств, при изменении номинальных значений начинает вычислять реальную координату поезда с некоторой ошибкой. Для исключения рассогласованности между реальной координатой и вычисленной требуется самонастройка решающей функции (модели системы) адаптивным алгоритмом, то есть появляется задача робастного и адаптивного управления моделью [21]. При управлении самонастройкой модели эффективно применение интеллектуального адаптивного принципа, предполагающего наличие обратной связи [22], но в условиях вычисления координат поезда на протяженных участках обратную связь невозможно организовать, поэтому можно воспользоваться принципами самонастройки на основе глубокой нейронной сети (DMRAC) [23], прямого адаптивного управления<sup>3</sup> [24]. Также

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Чинаев П. И. Самонастраивающиеся системы. Справочник. Киев : Наукова думка, 1969. 528 с. URL: <https://www.libex.ru/detail/book364467.html> (дата обращения: 20.05.2022).

эффективно решать проблему адаптивной настройки сложных систем с большими неопределенностями параметров возможно многомодельной схемой [25; 26].

Существует большое количество публикаций в области построения распознающих систем, классификаторов, функционирующих в условиях неопределенности, адаптивных систем управления с самонастройкой модели. Однако они часто направлены на решение задач построения систем и устройств с сосредоточенными параметрами, охваченными глубокой обратной связью, позволяющей оптимально управлять процессами распознавания, классификации. Использование множества информативных признаков, предварительного обучения решающей функции и самонастройки (подстройки) коэффициентов полиномов решающей функции, являющихся моделью автоматизированной системы определения координат поезда, позволяет решить задачу достоверного определения координат поезда.

### Материалы и методы

В существующих системах управления автоматической переездной сигнализацией в качестве информативного признака, фиксирующего вступление поезда на участок контроля, используется значение тока опроса датчика состояния рельсовых линий  $I_1$  и классификатор, подключенный на входе рельсовой линии участка приближения к переезду, реагирующий на вступление поезда и имеющий релейную характеристику:

$$d(X) = f[k(I_1)], \quad (1)$$

где  $d(X)$  – решающая функция классификатора;  $X$  – одномерный образ состояния;  $k$  – поправочный коэффициент;  $I_1$  – ток опроса датчика состояния рельсовых линий.

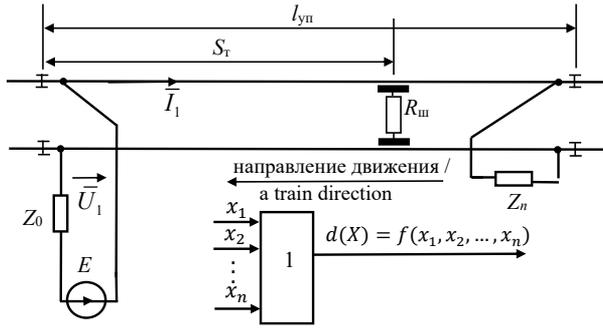
В общем случае выражение (1) – релейная функция, классифицирующая состояние рельсовой линии по правилу:

$$d(X) = \begin{cases} 1, & \text{если } I_1 \geq I_{1cp} \\ 0, & \text{если } I_1 \leq I_{1отп} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $I_{1cp}$  – ток полного подъема якоря реле, или ток срабатывания;  $I_{1отп}$  – ток, при котором тяговое усилие меньше значения, при котором реле отпускает якорь, то есть ток отпускания якоря реле;  $[1; 0]$  – состояния релейного классификатора.

Релейный классификатор при вступлении поезда на участок приближения переходит в обесточенное состояние, и устройства, ограждающие переезд от несанкционированного въезда автотранспорта перед приближающимся поездом на переезд, приводятся в действие. Это означает, что поезд вступил на участок приближения поезда к переезду, и движение автотранспорта следует остановить. Время ожидания автотранспорта в каждый момент представляется зависимостью  $t_{ож} = f(v_{т.п.}, l_{уп.})$ . В свою очередь,  $v_{т.п.} = f(s_t)$ , где  $s_t$  – текущая координата поезда на контрольном участке приближения. Такой алгоритм фиксации и приведения в действие ограждающих устройств является жестким, и, соответственно, время простоя автотранспорта у закрытого переезда в первую очередь зависит от текущих координат и скорости поезда.

Следовательно, если в каждый момент времени достоверно определять текущую координату поезда и вычислять текущую скорость, то можно синтезировать систему управления транспортными потоками на переезде с минимальным временем закрытого состояния для движения автотранспорта, то есть  $t_{ож} \rightarrow \min$ . На рисунке 1 представлена структурная схема, поясняющая принцип непрерывного определения координат поезда, представленного одиночным сопротивлением шунтирования рельсов контрольного участка  $R_{ш.}$



Р и с. 1. Структурная схема первичного датчика информации определения координаты поезда: 1 – решающее устройство вычисления координаты поезда;  $R_{ш}$  – сопротивление шунта поезда;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – информативные признаки, зависящие от координаты поезда;  $d(X)$  – решающая функция координаты поезда;

$Z_0, Z_n$  – полные сопротивления ограничителя тока источника и нагрузки рельсовой линии

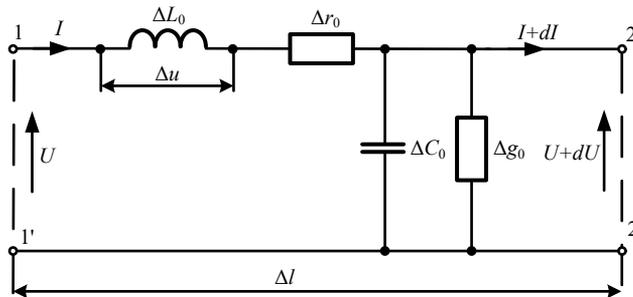
F i g. 1. Structural diagram of the primary detector for determining the coordinates of the train:

1 – decision device of train coordinates;  $R_{ш}$  – train shunt resistance;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – informative features depending on train coordinates;  $d(X)$  – decisive function of the train coordinates;

$Z_0, Z_n$  – impedances of the source current limiter and the load on the railway line

При вступлении поезда на участок приближения (координата  $Z_n$ ) изменяются значения первичных информативных признаков, составляющих образы состояний в каждый момент времени,  $X_i = (x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}), \forall i = 1, 2, \dots, n$ , и с использованием заранее обученной решающей функции  $d(x) = f(X_i)$  вычисляется координата поезда, используемая при вычислении текущей скорости поезда  $v_{т.п.}$ .

Чувствительным элементом датчика определения координат поезда является рельсовая линия контрольного участка приближения к переезду, представляемая на схеме замещения как линия с равномерно распределенными параметрами, входные электрические параметры которой зависят от координаты поезда; ее дифференциальная схема замещения представлена на рисунке 2.



Р и с. 2. Схема отрезка однородной линии с распределенными параметрами:  $L_0, r_0$  – продольная индуктивность рельсовой линии и активное сопротивление соответственно;  $g_0, C_0$  – поперечная емкость между рельсами и проводимость изоляции

F i g. 2. Scheme of a segment of a homogeneous line with distributed parameters:

$L_0, r_0$  – longitudinal inductance of a rail line and active resistance, respectively;  $g_0, C_0$  – transverse capacitance between the rails and insulation conductivity

Первые два параметра в схемах линий с распределенными параметрами составляют полное продольное сопротивление  $Z_{\Pi} = r_0 + j\omega L_0$ , вторые – полную поперечную проводимость  $Y_{\Pi} = g_0 + j\omega C_0$ . Входные электрические параметры линий с распределенными параметрами – векторы напряжений  $\bar{U}_1$  и токов  $\bar{I}_1$  – зависят от первичных параметров схемы замещения и воздействий, оказываемых на них. Таким образом, при движении поезда от начала рельсовой линии (2–2') к (1–1') (рис. 2) происходит ее постепенное шунтирование колесными парами поезда  $R_H$  с сопутствующим изменением первичных параметров  $g_0$ ,  $L_0$ ,  $r_0$ ,  $C_0$ , что отражается на изменении входных электрических параметров рельсовой линии – векторов  $\bar{U}_1$  и  $\bar{I}_1$ . Данное явление зависимости векторов  $\bar{U}_1; \bar{I}_1 = f(S_T)$  позволяет их использовать в качестве первичных информативных признаков, составляющих образы состояний  $X = (U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1)$  и являющихся аргументами полиномов решающей функции  $d(X) = f(U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1)$ .

Для получения аналитических выражений, связывающих входные электрические параметры рельсовой линии с первичными и вторичными параметрами рельсовой линии, представим дифференциальную схему замещения, представленную на рисунке 2, в виде обобщенной четырехполюсной схемы замещения рисунка 3.

Рассмотрим взаимосвязь векторов напряжений  $\bar{U}_1$  и токов  $\bar{I}_1$  с первичными и вторичными параметрами. Система уравнений, связывающих входные, выходные электрические параметры с первичными параметрами рельсового четырехполюсника, имеет вид

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = A\bar{U}_2 + B\bar{I}_2; \\ \bar{I}_1 = C\bar{U}_2 + D\bar{I}_2; \end{cases} \quad (3)$$

где

$$A = \text{ch}(\gamma l); \quad B = Z_B \text{sh}(\gamma l);$$

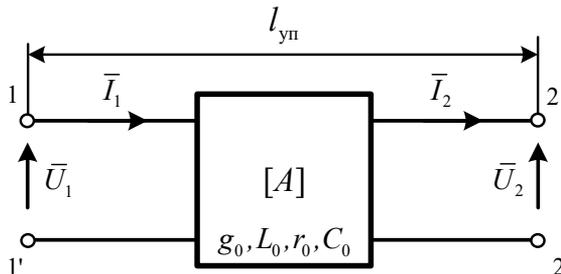
$$C = (1 / Z_B) \text{sh}(\gamma l); \quad D = A;$$

$$\gamma = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)} = \sqrt{Z_{\Pi} Y_{\Pi}};$$

$$Z_B = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0) / (g_0 + j\omega C_0)} = \sqrt{Z_{\Pi} / Y_{\Pi}};$$

где  $\gamma$ ,  $Z_B$  – вторичные параметры: коэффициент распространения волны вдоль рельсовой линии и волновое сопротивление;  $l$  – длина рельсовой линии, замещаемой четырехполюсной схемой.

В соответствии с (3) векторы напряжений и токов на питающем конце рельсовой линии зависят от длины рельсовой линии  $l$ , которая изменяется шунтированием рельсов колесной парой поезда, а также от значений первичных параметров рельсовой линии  $Z_{\Pi} = r_0 + j\omega L_0$ ,  $Y_{\Pi} = g_0 + j\omega C_0$ , и, соответственно, могут быть использованы в качестве первичных информативных признаков в образах состояний.



Р и с. 3. Обобщенная четырехполюсная схема замещения рельсовой линии

F i g. 3. Generalized four-pole rail line equivalent circuit

На качество распознавания координат поезда оказывают влияние различные возмущения, которые являются дестабилизирующими факторами, воздействующими на рельсовую линию с распределенными параметрами. Они подразделяются на два вида.

*Первый вид дестабилизирующего воздействия*

Дестабилизирующие воздействия могут иметь физическую природу измеряемых информативных признаков. Впоследствии они суммируются в какой-то координате с полезным сигналом (рис. 4).

Сигналы линий электропередач, пересекающие рельсовые линии не под прямым углом, а мешающие воздействию токов, протекающих по соседним рельсовым линиям, могут быть представлены в качестве реальных дестабилизирующих воздействий, имеющих природу информативного сигнала  $u(t)$ . Если передаточную функцию по напряжению рельсовой линии в операторной форме записать в виде  $w(p)$ , информационный сигнал  $u(p)$ , передаточную функцию помехи, воздействующей на рельсовую линию (РЛ), в виде  $w_f(p)$ , а помеху как  $f_a(p)$ , то уравнение линейной системы, с учетом воздействия помехи  $f_a$ , имеет вид

$$u_2(p) = w_{\text{РЛ}}(p)u_1(p) + w_f(p)f_a(p), \quad (4)$$

где  $w_{\text{РЛ}}(p)$ ,  $w_f(p)$  – передаточные функции по напряжению по управляющему воздействию  $u_1(p)$  и возмущениям  $f_a(p)$  соответственно;  $f_a(p)$  – произвольная аддитивная помеха.

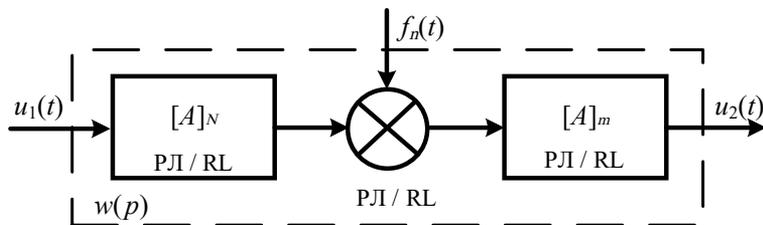
Решением уравнения с целью обеспечения инвариантности I вида воздействия является равенство 0 слагаемой помехи, а именно:

$$w_f(p)f_a(p) = 0. \quad (5)$$

Выполнить равенство (5) возможно введением в схему компаундирующего звена на входе рельсовой линии, способного компенсировать изменения входного сигнала из-за помехи, имеющей природу информативного сигнала<sup>4</sup>.

*Второй вид дестабилизирующего воздействия*

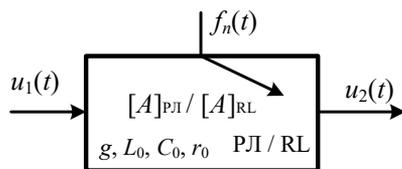
Второй вид дестабилизирующих воздействий влияет на выходную величину  $u_2(t)$  через изменение первичных параметров рельсовой линии  $Z = f(g_0, L_0, r_0, C_0)$ , где  $g_0$  – проводимость изоляции рельсовой линии,  $L_0$  – удельная индуктивность,  $C_0$  – удельная междурельсовая емкость,  $r_0$  – удельное активное сопротивление рельсовой линии. Такие возмущения являются параметрическими  $f_n(t)$  (рис. 5).



Р и с. 4. Структурная схема координатного воздействия на рельсовые линии сигнала помехи  $f_n(t)$ : РЛ – рельсовая линия

Fig. 4. Structural scheme of the interference signal coordinate effect on rail lines  $f_n(t)$ : RL – Rail line

<sup>4</sup> Моисеев Е. Г. Самонастраивающееся устройство контроля состояний рельсовых линий для систем управления поездопотоком: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2011. 163 с. URL: <https://www.disscat.com/content/samonastravayushcheya-ustroystvo-kontrolya-sostoyanii-relsovykh-liniilya-sistem-upravle> (дата обращения: 20.05.2022).



Р и с. 5. Структурная схема параметрического воздействия на сигнал опроса рельсовой линии  
 F i g. 5. Structural scheme of the coordinate effect on rail lines by the interference signa

Достоверное распознавание координат поезда в условиях изменения первичных параметров рельсовой линии  $Z = f(g_0, L_0, r_0, C_0)$ , являющихся параметрическими дестабилизирующими факторами,  $Z_0, Z_n \rightarrow var$ , сопряжено с весьма сложной реализацией решающей функции, алгоритмов ее обучения, разработки решающего правила классификации координат. В связи с этим неполная математическая формализуемость, высокая степень неопределенности при влиянии возмущающих воздействий формируют задачу построения обучаемой, самонастраивающейся интеллектуальной системы распознавания координат поезда, способной автоматически корректировать решающую функцию при изменении возмущающих воздействий. Для решения составленной задачи необходимо сформировать математические модели датчика информации (рельсовой линии с распределенными параметрами), выбрать вид решающей функции, сложность которой в процессе обучения и самонастройки корректируется, разработать алгоритм обучения и самонастройки полинома решающей функции.

Следует отметить, что правильность и достоверность определения текущих координат поезда  $s_t$  зависит от количества первичных информативных признаков и их отличительных свойств

при распознавании различных координат поезда. Это следует из неограниченного приближающего свойства признаков, которое гласит, что при увеличении количества признаков в образе вероятность достоверного распознавания стремится к единице<sup>5</sup>.

Наиболее эффективным инструментом для решения задач с размытыми образами вследствие действия дестабилизирующих факторов являются методы теории распознавания многопараметрических образов с решающим устройством, которые обладают внутренней логикой развития, и это позволяет решать задачи усложнения алгоритма распознавания на программном уровне без изменения структуры системы.

Система распознавания состоит из двух основных модулей: датчика и решающего устройства<sup>6</sup>. Датчик представляет собой устройство, преобразующее характеристики или состояния любой системы в физические измеряемые величины, позволяющие распознавать состояния рельсовых линий. Выходной характеристикой датчика являются информативные признаки, составляющие в  $i$ -й момент времени образ (вектор) состояния  $X = (U_i, \varphi_i, I_i, \psi_i)^T$ .

Решающее устройство представляет собой модуль, относящий каждый измеренный в любой момент времени образ к одному из конечных чисел

<sup>5</sup> Фомин Я. А. Статистическая теория распознавания образов. М. : Радио и связь, 1986. 264 с.

<sup>6</sup> Васильев В. И. Распознающие системы. Справочник. Киев : Наукова думка, 1983. 422 с. URL: <http://library.tuit.uz/knigiPDF/tex/1-2191.pdf> (дата обращения: 20.05.2022).

координат путем вычисления значения решающей функции, аргументами которой являются выходные характеристики блока селекции и формирования рабочего словаря признаков (рис. 6).

Применительно к распознаванию координат поезда в качестве датчика удобно использовать рельсовые цепи, так как они по определению являются первичным датчиком информации о состоянии рельсовых линий. Чувствительным элементом первичного датчика (рельсовой цепи) являются рельсовые линии, математически представляемые как линии с распределенными параметрами (рис. 2), нагруженные на входной импеданс системы распознавания.

Одним из важных блоков в обобщенной схеме распознавания является блок обучения. Данный блок по так называемой обучающей выборке образов, когда принадлежность каждого образа к определенной координате известна, позволяет сформировать решающую функцию оптимальной сложности. Помимо этого, процедура обучения, формируемая блоком обучения, позволяет создавать правила выбора (селекции) информативных признаков блока селекции признаков (БСП) [27].

Как отмечено выше, в первой фазе производится определение вида

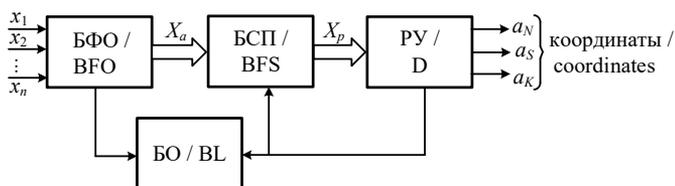
решающей функции, решающего правила и обучение решающей функции. В качестве примера рассмотрим систему распознавания координат поезда с использованием в качестве решающей функции полного полинома Колмогорова – Габора:

$$d(X) = C_0 + \sum_{i=1}^m C_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m C_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (6)$$

Если степень полинома равна числу аргументов  $m$ , то число членов полного полинома равно  $W = C_{2m}^m$ , и при разных  $m$  принимает значения 2, 6, 20, 70 и т. д. Например, для двух аргументов  $U_1$  и  $I_1$  ( $m = 2$ ) полином Колмогорова – Габора имеет шесть членов:

$$d(X) = C_0 + C_1 U_1 + C_2 I_1 + C_3 U_1 I_1 + C_4 U_1^2 + C_5 I_1^2.$$

В качестве решающего правила при вычислении координат поезда удобно использовать остаточную ошибку при вычислении разности между заданной координатой поезда при формировании обучающей выборки образов и координатой, вычисленной обученной решающей функцией:



Р и с. 6. Обобщенная схема системы распознавания координат поезда:

БФО – блок преобразования измеримой информации и формирования вектора априорного алфавита образов  $X_a$ ; БСП – блок селекции признаков и формирования рабочего словаря признаков  $X_p$ ; РУ – решающее устройство, вычисляющее координаты поезда; БО – блок обучения классификатора

F i g. 6. Generalized scheme for recognition and classification of rail lines states:

BFO – block of measurable information transformation and formation of a priori image alphabet vector  $X_a$ ; BFS – block of features selection and formation of a working glossary of features  $X_p$ ; D – decider; BL – classifier learning block

$$\Delta \varepsilon = S_r - d(X). \quad (7)$$

Одним из важных процессов при распознавании координат поезда на рельсовой линии участка приближения к переезду является обучение классификатора. Определение вида решающей функции и решающего правила создает предпосылку для разработки процедуры обучения решающей функции. В настоящее время известно и широко используется множество способов обучения решающей функции: градиентный метод, метод наименьшей среднеквадратичной ошибки, алгоритм перцептрона, метод многомерной аппроксимации. Наиболее простым и удобным способом обучения решающей функции в данном случае является многомерная аппроксимация. Для этого на первом этапе разрабатываются математические модели вектора информативных признаков с использованием уравнений (3) и структурной схемы, представленной на рисунке 1.

Воспользовавшись законами Кирхгофа и Ома, применительно к рисунку 1, получим:

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{E} - \bar{I}_1 Z_o; \\ \bar{I}_2 = \bar{U}_2 / Z_n. \end{cases} \quad (8)$$

Подставив в (3) выражения (8), получим:

$$\bar{U}_1 = \frac{\bar{E}(AZ_n + B)}{(CZ_n + D)Z_o + AZ_n + B} = U_1 e^{j\varphi_1}; \quad (9)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}(CZ_n + D)}{(CZ_n + D)Z_o + AZ_n + B} = I_1 e^{j\psi_1}. \quad (10)$$

На втором этапе с помощью имитационной модели рельсовой цепи контрольного участка приближения формируется массив образов, где каждому образу соответствует априорно известная координата:

$U_1^0 I_1^0 \equiv x_0$  – координата вступления поезда на участок приближения,

$$\left. \begin{aligned} U_1^1 I_1^1 &\equiv x_1 \\ U_1^2 I_1^2 &\equiv x_2 \end{aligned} \right\} \text{– текущие координаты}$$

поезда,

$U_1^{l_{\text{уп}}} I_1^{l_{\text{уп}}} \equiv x_{l_{\text{уп}}}$  – координата переезда, где  $l_{\text{уп}}$  – длина рельсовой линии участка приближения.

По полученным данным составляется система уравнений координаты поезда для значений проводимости изоляции в диапазоне  $g_{\text{min}} \leq g < g_{\text{max}}$  в виде

$$\left. \begin{cases} g_{\text{min}} \left\{ \begin{aligned} x_0 &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^0, I_1^0); \\ x_1 &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^1, I_1^1); \\ x_2 &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^2, I_1^2); \\ &\vdots \\ x_n &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^n, I_1^n); \end{aligned} \right. \\ \\ g_{\text{max}} \left\{ \begin{aligned} x_0 &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^0, I_1^0); \\ x_1 &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^1, I_1^1); \\ x_2 &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^2, I_1^2); \\ &\vdots \\ x_n &= \sum_{i=0}^n C_i f(U_1^n, I_1^n). \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (11)$$

И, решая систему, определяются искомые коэффициенты  $C_1 \dots C_n$ , которые формируют решающую функцию вычисления координаты поезда. Следует отметить, что вместо проводимости

изоляции могут быть применены и другие первичные параметры рельсовой цепи, относительно которых необходимо обеспечить инвариантность решающей функции.

### Результаты исследования

Применение всего одной координаты возмущающих воздействий для обеспечения инвариантности вызвано тем, что система уравнений (11) переопределенная, то есть число уравнений больше числа неизвестных коэффициентов  $C_1 \dots C_n$ . Это следует из определения: если количество значений  $g_0 = 100$  (количество систем уравнений по возмущающему фактору проводимости изоляции (11)) в диапазоне от 0,02 до 5 См/км, а количество координат 2 500 (количество уравнений в каждой системе (11)), при длине РЛ  $l = 2\ 500$  м через 1 м, то общее количество уравнений 250 000, а неизвестных коэффициентов от 6 до 70 при использовании в образе от 2 до 4 признаков. Сформированный ряд решающих функций решением системы уравнений (11) при различных образах имеет вид:

$$d(X) = -2,754 + 36,637U_1 + 0,472\psi_1 - 1,209U_1\psi_1 - 55,659U_1^2 - 5,775 \cdot 10^{-3}\psi_1^2; \quad (12)$$

$$d(X) = 1,907 + 0,09\varphi_1 + 0,188\psi_1 - 4,941 \cdot 10^{-3}\varphi_1\psi_1 - 3,208 \cdot 10^{-3}\varphi_1^2 + 2,14 \cdot 10^{-3}\psi_1^2; \quad (13)$$

$$d(X) = -13,43 - 0,358I_1 + 11,12\psi_1 + 0,14I_1\psi_1 - 2,516I_1^2 - 1,95 \cdot 10^{-3}\psi_1^2; \quad (14)$$

$$d(X) = -2,295 + 0,28\varphi_1 + 0,23I_1 - 0,07\varphi_1I_1 - 2,639 \cdot 10^{-3}\varphi_1^2 + 0,31I_1^2; \quad (15)$$

$$d(X) = 3,658 - 10,528U_1 + 0,026\varphi_1 + 0,261U_1\varphi_1 + 4,658U_1^2 - 2,786 \cdot 10^{-3}\varphi_1^2; \quad (16)$$

$$d(X) = -196,14 + 338,8U_1 + 100,82I_1 - 86,2U_1I_1 - 146,51U_1^2 - 12,821I_1^2. \quad (17)$$

В таблице 1 указаны погрешности вычисления координат поезда в начале участка приближения однофазным формированием решающих функций.

Таблица 1

Table 1

Таблица погрешности вычисления координат поезда в начале участка приближения однофазным формированием решающих функций

Table of errors in calculating the train coordinates at the beginning of the approach section by single-phase formation of the decision functions

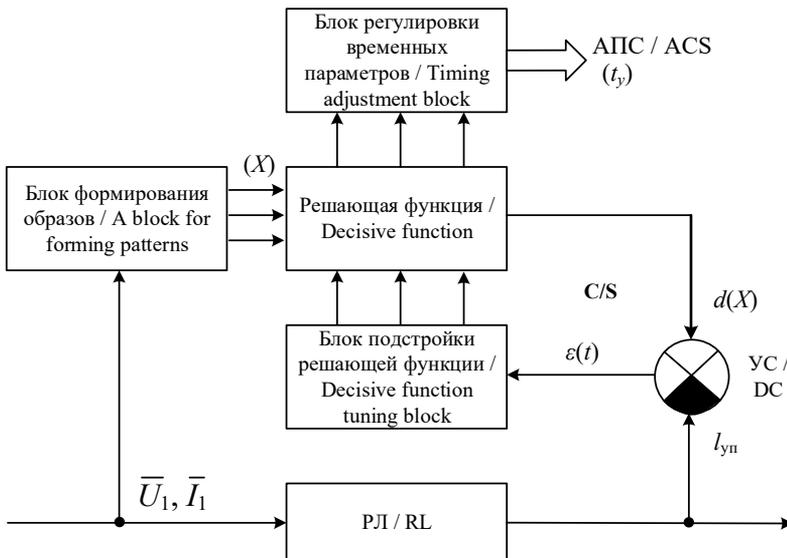
| Номер формулы / Formula number | Частота сигнального тока, Гц / Signal current frequency, Hz | Признаки в уравнении координаты / Features in the coordinate equation | Погрешность по проверочной выборке / Test sample accuracy |            |
|--------------------------------|---|---|---|------------|
|                                |   |   | в м / in m  | в % / in % |
| (12)                           | 50  | $U_1, \psi_1$   | 259,166   | 12,958     |
| (13)                           | 50  | $\varphi_1, \psi_1$   | 225,461   | 11,273     |
| (14)                           | 50  | $I_1, \psi_1$   | 134,637   | 6,732      |
| (15)                           | 50  | $\varphi_1, I_1$  | 116,581   | 5,829      |
| (16)                           | 50  | $U_1, \varphi_1$  | 128,060   | 6,402      |
| (17)                           | 50  | $U_1, I_1$  | 125,368   | 6,268      |

Включение в процесс обеспечения инвариантности по отношению следующего возмущающего воздействия, например  $r_0$ , приведет к увеличению количества уравнений дополнительно на 250 000 в случае, если диапазон изменения данного параметра рельсовой линии так же представлен в пределах 100. Такая система уравнений имеет очень приближенное решение и, соответственно, при определении координат появляется большая погрешность. Решение этой задачи возможно применением принципов адаптивной самонастройки на второй фазе создания автоматизированной системы определения координаты поезда с корректировкой решающей функции системы распознавания.

Самонастраивающаяся система с подстраиваемой решающей функцией в канале управления автоматической переездной сигнализацией, представленная на рисунке 7, состоит из датчика информации Д и канала самонастройки С.

Канал самонастройки С состоит из решающей функции, являющейся моделью самонастраиваемой системы, блока подстройки коэффициентов решающей функции.

Задача обученной решающей функции, как отмечено выше, состоит в вычислении текущих координат поезда по информации образов состояний. Рассмотрим функциональные связи системы. В установившемся режиме работы системы при номинальных значениях первичных параметров рельсовых линий (в определенном диапазоне) и отсутствии информации о воздействии дестабилизирующих факторов вычисленная координата начала участка приближения  $d(X)$  и записанная в память длина участка приближения совпадают. Если в силу тех или иных причин первичные параметры РЛ изменяются, варьируются (изменяются информативных признаков  $(\bar{U}_{1T}, \bar{I}_{1T})$ , выходная вычисленная информация о координате



Р и с. 7. Структурная схема самонастраиваемой системы с подстраиваемой решающей функцией: УС – устройство сравнения реальной координаты с вычисленной; РЛ – рельсовая линия; АПС – автоматическая переездная сигнализация; С – самонастройка

F i g. 7. Structural diagram of a self-tuning system with an adjustable decision function: DC – device for comparing the real coordinate with the calculated one; RL – rail line; ACS – automatic crossing signaling; S – self-tuning channel

начала рельсовой линии изменяется, и на выходе устройства сравнения появляется рассогласование:

$$\Delta \varepsilon = S_r - d(X). \quad (18)$$

Это рассогласование  $\Delta \varepsilon$  (ошибка определения координат) содержит информацию об изменении параметров РЛ и дестабилизирующих факторах устройств согласования. Используя эту информацию, блок подстройки решающей функции производит корректировку полинома решающей функции таким образом, чтобы устранить возникшее рассогласование (18). Коэффициенты полинома подстраиваются (изменяются) до тех пор, пока рассогласование  $\Delta \varepsilon$  не станет равным нулю (или допустимому значению  $\Delta \varepsilon \leq \varepsilon_0$ ). При  $\Delta \varepsilon = 0$  значения коэффициентов полинома решающей функции будут новыми, и решающая функция примет новый вид. На этом самонастройка решающей функции завершается.

Алгоритм самонастройки решающей функции в комплексе автоматической переездной сигнализации реализован в виде следующих шагов (рис. 8).

- Шаг 1. Ввод обученной решающей функции, сформированной в подпрограммах *OBUCH* и *TEST*.
- Шаг 2. Ввод начального значения счетчика итераций  $k$ .
- Шаг 3. Организация цикла по значению  $i$ , имеющему границу изменений  $n$  по количеству коэффициентов, то есть  $C_0 \div C_n$ .
- Шаг 4. Текущему значению  $i$ -го коэффициента  $C_i$  присваивается значение  $C_{inorm}$ , используемое в заданной решающей функции (шаг 1).
- Шаги 5, 6. Задаются значения шага изменения текущего коэффициента  $C_i$ .

- Шаги 7, 8. Определяются новые значения  $i$ -го коэффициента РФ  $C_{i(+)}$  и  $C_{i(-)}$  при положительном и отрицательном приращении. Они вычислены с помощью приращения текущего значения  $C_i$  на шаг  $\Delta C_i$ .
- Шаги 9, 10. С помощью решающей функции с измененным коэффициентом  $C_{i(+)}$  или  $C_{i(-)}$  решающей функции определяются значения рассогласования  $\Delta \varepsilon$  (11).
- Шаг 11. Значения  $C_{i(+)}$ ,  $C_{i(-)}$ , соответствующие им шаги изменения коэффициента  $\Delta C_i$  и рассогласование  $\Delta \varepsilon(C_{i(+)})$  и  $\Delta \varepsilon(C_{i(-)})$  записываются в  $i$ -ю строку матрицы данных  $C \varepsilon$ .
- Шаг 12. Из сформированной матрицы  $C \varepsilon$  определяется минимальное рассогласование  $\Delta \varepsilon_{min}$ , соответствующий ему измененный коэффициент решающей функции  $C_i$  и шаг изменения коэффициента  $\Delta C_i$ .
- Шаг 13. Для  $i$ -го коэффициента решающей функции  $C_{inorm}$  присваивается значение, найденное из шага 12:  $C_{inorm} = C_i$ .
- Шаг 14. Вычисляется новое значение коэффициента решающей функции  $C_{i+1}$  путем приращения текущего коэффициента  $w_i$  на шаг  $\Delta C_i$ .
- Шаг 15. Проверяется условие уменьшения рассогласования  $\Delta \varepsilon(C_{i(+)})$  новых коэффициентов по сравнению с текущим  $\Delta \varepsilon(C_i)$ : если «да», то есть  $\Delta \varepsilon(C_{i+1}) \leq \Delta \varepsilon(C_i)$ , то переход к шагу 16; если «нет», то есть  $\Delta \varepsilon(C_{i+1}) \geq \Delta \varepsilon(C_i)$ , то переход к шагу 13.
- Шаг 16. Производится приращение счетчика итераций  $k = k + 1$ .

Шаг 17. Проверяется условие недо-стижения максимального значения количества итераций: если «да», т.е. текущая итерация  $k$  меньше максимального значения количества итераций  $k_{\max}$ , то осуществляется переход к шагу 3; если «нет», значит, текущая итерация  $k$  достигла максимального значения количества итераций  $k_{\max}$ , и программа заканчивает свое выполнение.

Описанный алгоритм реализован в программно-математическом пакете MATLAB, проведены исследования изменения рассогласования (11) в зависимости от вида решающей функции и сочетания информативных признаков в образах. В алгоритме учитывается постоянный временной интервал, необходимый для закрытия переезда: 40 с при светофорной сигнализации, 50 с при автоматических шлагбаумах, 50 с при оповестительной сигнализации.

Сформирован новый оптимальный ряд решающих функций на основе

- использования четырех первичных признаков,
- предварительно определенных решающих функций (12)–(17), полученных с учетом изменения одного дестабилизирующего фактора,
- обучения решающей функции по (11) на первой фазе,
- применения алгоритма самонастройки на второй фазе, представленного в виде блок-схемы на рисунке 8.

Из полученного ряда решающих функций выбраны 6 (реализованные двумерными образами), которые имеют минимальную погрешность определения координат поезда при использовании тока опроса датчика промышленной частоты 50 Гц:

$$d(X) = -2,784 + 36,537U_1 + 0,492\psi_1 - 1,209U_1\psi_1 - 55,669U_1^2 - 5,775 \cdot 10^{-3}\psi_1^2; \quad (19)$$

$$d(X) = 1,86 + 0,093\varphi_1 + 0,189\psi_1 - 4,941 \cdot 10^{-3}\varphi_1\psi_1 - 3,208 \cdot 10^{-3}\varphi_1^2 + 2,141 \cdot 10^{-3}\psi_1^2; \quad (20)$$

$$d(X) = -13,437 - 0,359I_1 + 11,14\psi_1 + 0,14I_1\psi_1 - 2,516I_1^2 - 1,96 \cdot 10^{-3}\psi_1^2; \quad (21)$$

$$d(X) = -2,3 + 0,299\varphi_1 + 0,243I_1 - 0,071\varphi_1I_1 - 2,639 \cdot 10^{-3}\varphi_1^2 + 0,319I_1^2; \quad (22)$$

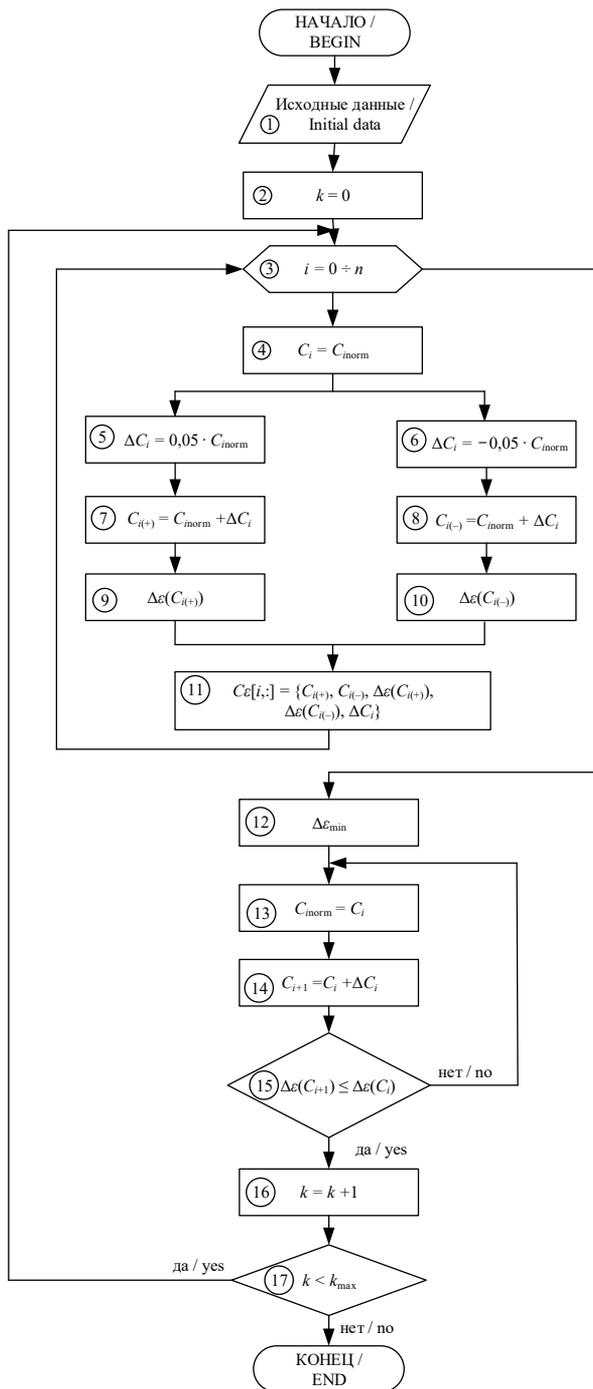
$$d(X) = 3,635 - 10,531U_1 + 0,026\varphi_1 + 0,26U_1\varphi_1 + 4,658U_1^2 - 2,786 \cdot 10^{-3}\varphi_1^2; \quad (23)$$

$$d(X) = -196,141 + 338,809U_1 + 100,832I_1 - 86,204U_1I_1 - 146,51U_1^2 - 12,821I_1^2. \quad (24)$$

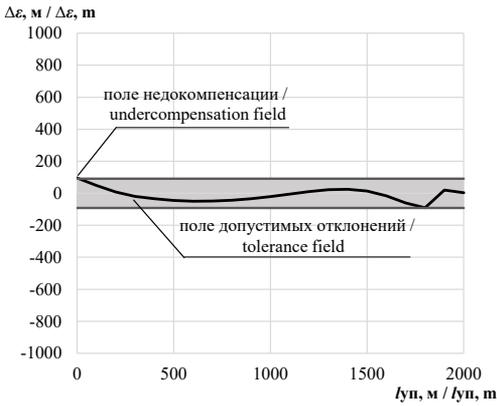
Результаты исследований представлены в виде графиков максимальной ошибки определения координаты поезда предварительно обученными и прошедшими самонастройку решающими функциями (рис. 9).

В таблице 2 указаны погрешности вычисления координат поезда в начале участка приближения двухфазным формированием решающих функций.

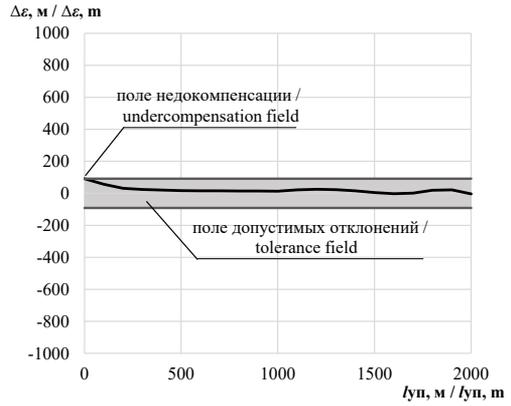
Анализ результатов исследований двухфазного формирования решающих функций при различных двумерных образах, представленных на графиках и в таблице результатов исследований, показывает, что в зависимости от сочетаний признаков в образах максимальная ошибка определения



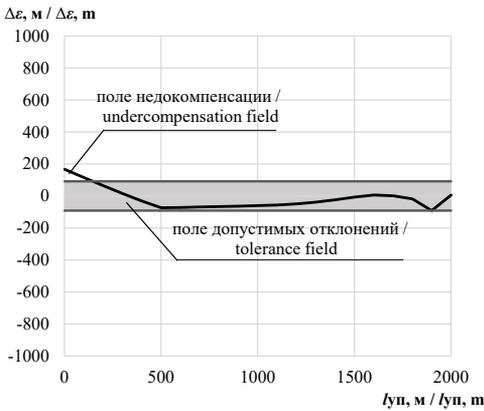
Р и с. 8. Блок-схема алгоритма самонастройки РФ подстройкой коэффициентов полинома РФ  
 F i g. 8. Flowchart of self-tuning algorithm of a decision function by tuning polynomial coefficients  
 of a decision function



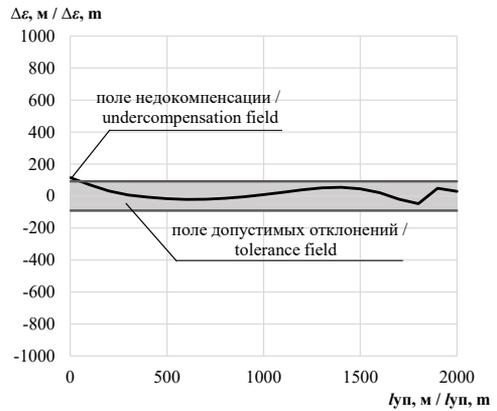
а)



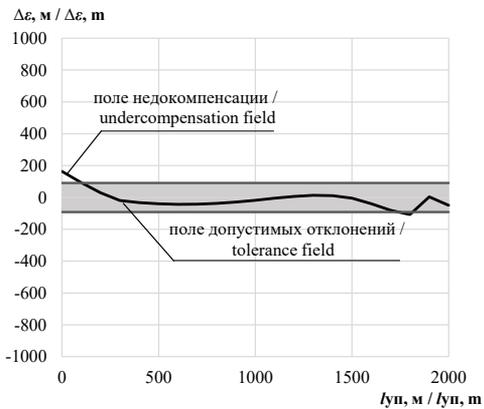
б)



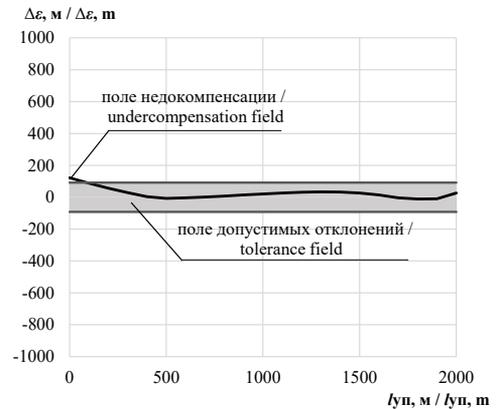
в)



г)



е)



ж)

Р и с. 9. Графики зависимостей: а)  $d(X) = f(U_1, \psi_1)$ ; б)  $d(X) = f(\varphi_1, \psi_1)$ ; в)  $d(X) = f(I_1, \psi_1)$ ;  
 д)  $d(X) = f(\varphi_1, I_1)$ ; е)  $d(X) = f(U_1, \varphi_1)$ ; ж)  $d(X) = f(U_1, I_1)$

F i g. 9. Dependency graphs: а)  $d(X) = f(U_1, \psi_1)$ ; б)  $d(X) = f(\varphi_1, \psi_1)$ ; в)  $d(X) = f(I_1, \psi_1)$ ;  
 д)  $d(X) = f(\varphi_1, I_1)$ ; е)  $d(X) = f(U_1, \varphi_1)$ ; ж)  $d(X) = f(U_1, I_1)$

Таблица погрешности вычисления координат поезда в начале участка приближения двухфазным формированием решающих функций

A table of error in calculating train coordinates at the beginning of the approach section by two-phase formation of decision functions

| Номер формулы / Formula number | Частота сигнального тока, Гц / Signal current frequency, Hz | Признаки в уравнении координаты / Features in the coordinate equation | Погрешность после самонастройки / Accuracy after self-tuning |            |
|--------------------------------|---|---|--|------------|
|                                |   |   | в м / in m   | в % / in % |
| (19)                           | 50  | $U_1, \psi_1$   | 199,340  | 9,967      |
| (20)                           | 50  | $\varphi_1, \psi_1$   | 164,101  | 8,205      |
| (21)                           | 50  | $I_1, \psi_1$   | 121,804  | 6,090      |
| (22)                           | 50  | $\varphi_1, I_1$  | 115,253  | 5,763      |
| (23)                           | 50  | $U_1, \varphi_1$  | 97,795   | 4,890      |
| (24)                           | 50  | $U_1, I_1$  | 91,489   | 4,574      |

координат может изменяться от 91,489 до 199,34 м при длине участка приближения 2 000 м, и погрешность составляет от 9,967 до 4,574 %. Минимальная погрешность достигается при использовании в образе  $X = (U_1, I_1)$ . Если сравнить результаты, полученные однофазным формированием решающей функции, представленные в таблице 1, то минимальная погрешность составит 5,829 %, или 116,581 м, при сочетании в образе  $X = (\varphi_1, I_1)$ . Удовлетворительным условием решения задачи формирования решающей функции считается нахождение в пределах зоны максимального допустимого отклонения 5 % (рис. 9е, 9г) графика  $d(X)$ . Необходимо иметь в виду, что результаты однофазного формирования решающей функции получены решением системы уравнений (11) при воздействии всего лишь одного дестабилизирующего воздействия  $g_0$ , а результаты двухфазного формирования решающей функции – при воздействии нескольких дестабилизирующих воздействий и самонастройкой по полиномам решающих функций.

#### Обсуждение и заключение

На основе теоретических исследований были выделены 2 этапа (фазы) формирования решающей функции вычисления координат поезда, инвариантной

к изменению первичных параметров рельсовых линий и номиналов элементов согласующих устройств с источником питания информационного сигнала опроса датчика и входным импедансом системы распознавания координат поезда.

На первом этапе с помощью обучающей выборки образов формируется предварительная решающая функция, а на втором решающая функция адаптивно самонастраивается (корректируется) при возникновении ошибки вычисления координат поезда. В результате с использованием множества из 6 признаков  $m = \{U_1, I_1, \varphi_1, \psi_1, U_2, \varphi_2\}$  сформированы 6 решающих функций двумерными образами. Они имеют различную погрешность определения координат поезда и поле недокомпенсации ошибки. Диапазон погрешности варьируется от максимального 9,967 % (199,34 м) до минимального 4,574 % (91,489 м) значения. Ошибка определения с погрешностью не более 5 % у двух решающих функций удовлетворяет требованиям заблаговременного закрытия переезда, так как в 45-секундном интервале времени для приведения в действие автоматической переездной сигнализации расстояние 100 м преодолевается за 3 секунды, то есть затраченное время составляет всего 3 секунды в 45-секундном интервале.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Machine Learning Methods Based on Probabilistic Decision Tree under the Multi-Valued Preference Environment / W. Zhou [et al.] // *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*. 2022. Vol. 35, Issue 1. P. 38–59. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/1331677X.2021.1875866?scroll=top&needAccess=true> (дата обращения: 20.05.2022).
2. Sarker I. H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions [Электронный ресурс] // *SN Computer Science*. 2021. Vol. 2, Issue 160. doi: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>
3. Boukerche A., Wang J. Machine Learning-Based Traffic Prediction Models for Intelligent Transportation Systems [Электронный ресурс] // *Computer Networks*. 2020. Vol. 181, Issue 3. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107530>
4. Security System for Railway Crossings Using Machine Learning / G. Singh [et al.] // 2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN) (18–19 December 2020). Noida : IEEE, 2020. P. 135–139. doi: <https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362976>
5. Falahati A., Shafiee E. Improve Safety and Security of Intelligent Railway Transportation System Based on Balise Using Machine Learning Algorithm and Fuzzy System // *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 2022. Vol. 20. P. 117–131. doi: <https://doi.org/10.1007/s13177-021-00274-1>
6. Тарасов Е. М., Тарасова А. Е. Разработка устройства вычисления скорости подвижной единицы на рельсовом пути // *Вестник СамГУПС*. 2019. № 1. С. 123–130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38098897> (дата обращения: 20.05.2022).
7. Zheng Z., Dai S., Xie X. Research on Fault Detection for ZPW-2000A Jointless Track Circuit Based on Deep Belief Network Optimized by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 175981–175997. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025628>
8. Parametric Synthesis of a Track Condition Classifier / E. M. Tarasov [et al.] // *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, Issue 3. P. 183–185. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068371220030189>
9. Alawad H., Kaewunruen S., An M. Learning from Accidents: Machine Learning for Safety at Railway Stations // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 633–648. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962072>
10. Somogyi Z. Machine Learning Algorithms // *The Application of Artificial Intelligence*; Ed. by Z. Somogyi. Cham : Springer, 2021. P. 17–86. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60032-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60032-7_2)
11. Tou J. T., Gonzalez R. C. *Pattern Recognition Principles*. London-Amsterdam-Dordrecht, Ontario-Sydney-Tokyo. Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 378 p. doi: <https://doi.org/10.1002/zamm.19770570626>
12. Разработка обучаемого классификатора состояний рельсовых линий с многомерными информативными признаками / Д. В. Железнов [и др.] // *Труды СПИИРАН*. 2017. № 1. С. 32–54. URL: <http://proceedings.spiiras.nw.ru/index.php/sp/article/view/3436> (дата обращения: 20.05.2022).
13. Kocbek S., Gabrys B. Automated Machine Learning Techniques in Prognostics of Railway Track Defects // *International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)* (08–11 November 2019). Beijing : IEEE, 2019. P. 777–784. doi: <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2019.00115>
14. Присухина И. В., Борисенко Д. В. Машинная классификация режима работы электрической рельсовой цепи на основе логистической регрессии // *Омский научный вестник*. 2018. № 6. С. 126–130. doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-162-126-130>
15. Борисенко Д. В., Присухина И. В., Лунев С. А. Машинная классификация режима работы электрической рельсовой цепи на основе логистической регрессии // *Омский научный вестник*. 2018. № 4. С. 67–72. doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-160-67-72>
16. Tan H. Machine Learning Algorithm for Classification [Электронный ресурс] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021 International Conference on Big Data and Intelligent Algorithms (BDIA 2021) (9–11 July 2021). Vol. 1994. Chongqing, 2022. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1994/1/012016>

17. Supervised Machine Learning: Algorithms and Applications [Электронный ресурс] / Sh. H. Shetty [et al.] // Fundamentals and Methods of Machine and Deep Learning ; Ed. by P. Singh. New York : Wiley, 2022. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119821908.ch1>
18. Golden R. Formal Machine Learning Algorithms // Statistical Machine Learning: A Unified Framework ; Ed. by R. Golden. 1<sup>st</sup> ed. New York : Chapman and Hall/CRC, 2020. 524 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781351051507-3>
19. Ray S. A Quick Review of Machine Learning Algorithms // International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon) (14–16 February 2019). Faridabad : IEEE, 2019. P. 35–39. doi: <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862451>
20. Rakcheeva T. Focal Model in the Pattern Recognition Problem // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. AIMEE2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing ; Ed. by Z. Hu, S. Petoukhov, M. He. Vol. 902. Cham : Springer, 2020. P. 127–138. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5_12)
21. Leurent E., Efimov D., Maillard O.-A. Robust-Adaptive Control of Linear Systems: beyond Quadratic Costs [Электронный ресурс] // ArXiv. 2020. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.10816>
22. Zile M. Intelligent and Adaptive Control // Microgrid Architectures, Control and Protection Methods ; Ed. by M. N. Tabatabaei, E. Kabalci, N. Bizon. New York : Springer, 2020. P. 423–446. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3_17)
23. Girish J., Vasvir V., Girish Ch. Asynchronous Deep Model Reference Adaptive Control [Электронный ресурс] // ArXiv. 2020. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.02920>
24. Lopez B. T., Slotine J.-J. E. Universal Adaptive Control of Nonlinear Systems // IEEE Control Systems Letters. 2022. Vol. 6. P. 1826–1830. doi: <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3133359>
25. Theory and Application of Multi-Model Adaptive Control / Zh. Yuzhen [et al.] // Journal of Engineering Science. 2020. Vol. 42, Issue 2. P. 135–143. doi: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.02.25.006>
26. Разработка обучаемого классификатора состояний с множеством моделей распознавания образов / Е. М. Тарасов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 4. С. 659–682. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.659-682>
27. Тарасов Е. М., Герус В. Л., Тарасова А. Е. Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 191–206. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.191-206>

*Поступила 24.05.2022; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 04.07.2022*

*Об авторах:*

**Тарасов Евгений Михайлович**, заведующий кафедрой автоматике, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения (443066, Российская Федерация, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343>, Researcher ID: C-2505-2018, Scopus ID: 57076210800, tarasov53em@yandex.ru

**Тарасова Анна Евгеньевна**, аспирант кафедры автоматике, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения (443066, Российская Федерация, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-6036>, Researcher ID: C-2497-2018, tarasova.ann@list.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Е. М. Тарасов – постановка задачи, консультирование по теоретической части, анализ результатов исследований, разработка математических моделей.

А. Е. Тарасова – обработка результатов исследований, проведение исследований с использованием программного средства Matlab, анализ литературных источников.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Zhou W., Lu Y., Liu M., Zhang K. Machine Learning Methods Based on Probabilistic Decision Tree under the Multi-Valued Preference Environment. *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*. 2022;35(1):38–59. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/1331677X.2021.1875866?scroll=top&needAccess=true> (accessed 20.05.2022).
2. Sarker I.H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN Computer Science*. 2021;2(160). doi: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>
3. Boukerche A., Wang J. Machine Learning-Based Traffic Prediction Models for Intelligent Transportation Systems. *Computer Networks*. 2020;181(3). doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107530>
4. Singh G., Kumar P., Mishra R.K., et al. Security System for Railway Crossings Using Machine Learning. In: 2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN) (18–19 December 2020). Noida: IEEE; 2020. p. 135–139. doi: <https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362976>
5. Falahati A., Shafiee E. Improve Safety and Security of Intelligent Railway Transportation System Based on Balise Using Machine Learning Algorithm and Fuzzy System. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 2022;20:117–131. doi: <https://doi.org/10.1007/s13177-021-00274-1>
6. Tarasov Ye.M., Tarasova A.Ye. [Development of a Device for Calculating the Speed of a Mobile Unit on the Rail Track]. *Vestnik SamGUPS*. 2019;(1):123–130. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38098897> (accessed 20.05.2022). (In Russ.)
7. Zheng Z., Dai S., Xie X. Research on Fault Detection for ZPW-2000A Jointless Track Circuit Based on Deep Belief Network Optimized by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. *IEEE Access*. 2020;8:175981–175997. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025628>
8. Tarasov E.M., Andronchev I.K., Bulatov A.A., Teplyakov V.B. Parametric Synthesis of a Track Condition Classifier. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(3):183–185. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068371220030189>
9. Alawad H., Kaewunruen S., An M. Learning from Accidents: Machine Learning for Safety at Railway Stations. *IEEE Access*. 2020;8:633–648. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962072>
10. Somogyi Z. Machine Learning Algorithms. In: Somogyi Z. (ed.) *The Application of Artificial Intelligence*. Cham: Springer; 2021. p. 17–86. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60032-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60032-7_2)
11. Tou J.T., Gonzalez R.C. *Pattern Recognition Principles*. London-Amsterdam-Dom Mills, Ontario-Sydney-Tokyo. Addison-Wesley Publishing Company; 1974. 378 p. doi: <https://doi.org/10.1002/zamm.19770570626>
12. Zheleznov D.V., Tarasov Ye.M., Isaycheva A.G., Mikheeva T.I. Development of the Learning Classifier of Rail Lines States with Multivariate Informative Features. *SPIIRAS Proceedings*. 2017;(1):32–54. Available at: <http://proceedings.spiiras.nw.ru/index.php/sp/article/view/3436> (accessed 20.05.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kocbek S., Gabrys B. Automated Machine Learning Techniques in Prognostics of Railway Track Defects. In: International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW) (08–11 November 2019). Beijing: IEEE; 2019. p. 777–784. doi: <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2019.00115>
14. Prisukhina I.V., Borisenko D.V. [Machine Classification of Electric Rail Circuit Operating Mode Based on Logistic Regression]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;(6):126–130. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-162-126-130>
15. Borisenko D.V., Prisukhina I.V., Lunev S.A. [Machine Classification of Electric Rail Circuit Operating Mode Based on Logistic Regression]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;(4):67–72. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-160-67-72>
16. Tan H. Machine Learning Algorithm for Classification. In: *Journal of Physics: Conference Series*. 2021 International Conference on Big Data and Intelligent Algorithms (BDIA 2021) (9–11 July 2021). Vol. 1994. Chongqing; 2022. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1994/1/012016>
17. Shetty Sh.H., Shetty S., Singh Ch., et al. Supervised Machine Learning: Algorithms and Applications. In: Singh P. (ed.) *Fundamentals and Methods of Machine and Deep Learning*. New York: Wiley; 2022. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119821908.ch1>

18. Golden R. Formal Machine Learning Algorithms. Golden R. (ed.) Statistical Machine Learning: A Unified Framework. 1<sup>st</sup> ed. New York: Chapman and Hall/CRC; 2020. 524 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781351051507-3>
19. Ray S. A Quick Review of Machine Learning Algorithms. In: International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon) (14–16 February 2019). Faridabad: IEEE; 2019. p. 35–39. doi: <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862451>
20. Rakcheeva T. Focal Model in the Pattern Recognition Problem. In: Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds.) Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. AIMEE2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 902. Cham: Springer; 2020. p. 127–138. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5_12)
21. Leurent E., Efimov D., Maillard O.-A. Robust-Adaptive Control of Linear Systems: beyond Quadratic Costs. *ArXiv*. 2020. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.10816>
22. Zile M. Intelligent and Adaptive Control. In: Tabatabaei M.N., Kabalci E., Bizon N. (eds.) Microgrid Architectures, Control and Protection Methods. New York: Springer; 2020. p. 423–446. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3_17)
23. Girish J., Vasvir V., Girish Ch. Asynchronous Deep Model Reference Adaptive Control. *ArXiv*. 2020. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.02920>
24. Lopez B.T., Slotine J.-J.E. Universal Adaptive Control of Nonlinear Systems. *IEEE Control Systems Letters*. 2022;6:1826–1830. doi: <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3133359>
25. Yuzhen Zh., Qing L., Weicun Zh., Yuhang Y. Theory and Application of Multi-Model Adaptive Control. *Journal of Engineering Science*. 2020;42(2):135–143. doi: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.02.25.006>
26. Tarasov E.M., Andronchev I.K., Bulatov A.A., et al. Development of a Trainable Classifier of State of Rail Lines with Multiple Patterns of Image Recognition. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(4):659–682. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.659-682>
27. Tarasov E.M., Gerus V.L., Tarasova A.E. Study of Informative Value of Features in Rail Condition Monitoring. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(2):191–206. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.191-206>

*Submitted 24.05.2022; approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 04.07.2022*

*About the authors:*

**Evgeny M. Tarasov**, Head of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University (2V Svoboda St., Samara 443066, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343>, Researcher ID: C-2505-2018, Scopus ID: 57076210800, tarasov53em@yandex.ru

**Anna E. Tarasova**, Postgraduate Student of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University (2V Svoboda St., Samara 443066, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-6036>, Researcher ID: C-2497-2018, tarasova.ann@list.ru

*Contribution of the authors:*

E. M. Tarasov – problem statement, theoretical consulting, analysis of research results, development of mathematical models.

A. E. Tarasova – processing the research results, conducting the research using Matlab software, analyzing literary sources.

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

## ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ / FOOD SYSTEMS

УДК 637.13:628.9.037

doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.460-475

Научная статья



### Изменение спектральных фотолюминесцентных свойств молока при скисании

М. В. Беляков<sup>1</sup>✉, Г. Н. Самарин<sup>1</sup>, А. А. Кудрявцев<sup>1</sup>,  
И. Ю. Ефременков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Применение цифровых технологий позволит увеличить эффективность животноводства. К таким технологиям можно отнести оптический мониторинг качества продукции. Цель исследования – изучение зависимости спектральных характеристик и параметров возбуждения и люминесценции молока при скисании.

**Материалы и методы.** Для измерений использовали молоко с жирностью 3,2 %. Кислотность контролировали титриметрическим методом. Спектры возбуждения и регистрации люминесценции измеряли на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» в диапазоне 200–500 нм. Вычисляли интегральные и статистические параметры спектров в программах PanoramaPro и Microcal Origin.

**Результаты исследования.** При скисании молока спектры возбуждения смещаются вниз, при этом в диапазоне 350–500 нм наблюдается качественное изменение характеристик, хотя абсолютный уровень фотосигнала почти на порядок меньше, чем при 220–340 нм. Поток фотолюминесценции при возбуждении излучением с длиной волны 262 нм уменьшается в процессе скисания. Поток при возбуждении излучением 385 нм, наоборот, увеличивается, особенно за первые трое суток. Поток при возбуждении 442 нм уменьшается незначительно. Статистические параметры и энергия спектров фотолюминесценции неинформативны для контроля скисания молока. Зависимость отношения потоков фотолюминесценции при возбуждении излучением 385 и 442 нм от кислотности линейно аппроксимируется с коэффициентом детерминации 0,99.

**Обсуждение и заключение.** Изменение люминесцентных свойств молока можно использовать как маркер его скисания с контролем кислотности. Для создания метода контроля показателей качества молока при скисании наиболее информативным является использование длин волн возбуждения 385 и 442 нм с последующей регистрацией фотолюминесценции в диапазонах 440–490 и 490–600 нм соответственно.

**Ключевые слова:** молоко, кислотность, оптические спектры, поток фотолюминесценции, линейная регрессионная модель

© Беляков М. В., Самарин Г. Н., Кудрявцев А. А., Ефременков И. Ю., 2022



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

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

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

**Для цитирования:** Изменение спектральных фотолюминесцентных свойств молока при скисании / М. В. Беляков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 460–475. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475>

Original article

## Change of Spectral Photoluminescent Properties of Milk during Souring

M. V. Belyakov<sup>a</sup>✉, G. N. Samarin<sup>a</sup>, A. A. Kudryavtsev<sup>a</sup>,  
I. Yu. Efremenkov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)

<sup>b</sup> Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russian Federation)

✉ [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The use of digital technologies will increase the efficiency of animal husbandry. These technologies include optical monitoring of product quality. The aim of the research is to study the dependence of the spectral characteristics and parameters of excitation and luminescence of milk during souring.

**Materials and Methods.** The milk with a fat content of 3.2% was used for measurements. The acidity was controlled by the titrimetric method. The excitation and luminescence registration spectra were measured on a Fluorat-02-Panorama spectrofluorimeter in the range of 200–500 nm. Spectra parameters were calculated in the PanoramaPro and Microcal Origin programs.

**Results.** When milk sours, excitation spectra shift downwards, while a qualitative change in characteristics is observed with the range of 350–500 nm, although the photoelectric signal absolute level is almost an order of magnitude less than with a range of 220–340 nm. The photoluminescence flux when excited by the radiation with wavelength of 262 nm decreases during the souring process. The flux excited by the radiation with wavelength of 385 nm increases especially in the first three days. The flux at wavelength of 442 nm decreases slightly. Statistical parameters and energy of photoluminescence spectra are not informative for the milk souring control. The dependence of the ratio of photoluminescence fluxes excited by the radiation of 385 and 442 nm on acidity is linearly approximated with a determination coefficient of 0.99.

**Discussion and Conclusion.** The change in the milk luminescent properties can be used as a marker of its souring with acidity control. To create a method for monitoring milk quality indicators during souring, the most informative is the use of excitation wavelengths of 385 and 442 nm with subsequent registration of photoluminescence in the ranges 440–490 and 490–600 nm respectively.

**Keywords:** milk, acidity, optical spectra, photoluminescence flux, linear regression model

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

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

**For citation:** Belyakov M.V., Samarin G.N., Kudryavtsev A.A., Efremenkov I.Yu. Change of Spectral Photoluminescent Properties of Milk during Souring. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):460–475. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475>

## Введение

Применение стремительно развивающихся цифровых технологий, системы интернета вещей, роботизированных комплексов и искусственного интеллекта позволит многократно увеличить эффективность сельскохозяйственного производства, в том числе животноводства. Здесь возможно повышение производительности труда, снижение энергетических и материальных затрат, обеспечение экологической безопасности сельскохозяйственного производства и окружающей среды. При разработке концепции интеллектуального сельского хозяйства выделяют следующие сферы применения цифровых технологий: комплексное управление сельскохозяйственным производством; цифровые технологии в растениеводстве, животноводстве, энергообеспечении, хранении и переработке продукции<sup>1</sup> [1].

Важным условием эффективного производства и переработки молока на молочно-товарных фермах, особенно в крестьянских (фермерских) хозяйствах, является:

- мониторинг состояния дойного стада и каждой коровы индивидуально;
- мониторинг качества получаемой продукции;
- контроль исправности технологического оборудования доения и первичной обработки молока и управление этими технологическими процессами;
- оптимизация энергетических и экономических затрат при доении коров, первичной обработке и переработке молока [2].

Перечисленные задачи могут быть решены путем использования данных, получаемых по результатам измерения показателей качества молока.

Схема контроля сырья, продуктов и технологического процесса

в различных экономических зонах включает следующую информацию:

1. Показатель;
2. Норма;
3. Метод отбора проб;
4. Метод исследований.

Методы исследований молока и молочных продуктов (табл. 1). Таблица 1 подготовлена на основе распоряжения (ЕС) № 854/2004 Европейского парламента и Совета от 29 апреля 2004 г., устанавливающего особые правила, касающиеся организации официальных контролей в отношении продуктов животного происхождения, предназначенных для употребления в пищу человеком<sup>2</sup>.

Из таблицы 1 видно, что для определения пяти показателей (жир, белок, лактоза, мочевины, количество соматических клеток) оценки качества молока и молочных продуктов в Европейском союзе (ЕС) используются оптические методы исследования. В данной работе мы исследуем возможность применения оптического метода для определения кислотности молока, которая напрямую связана с общим количеством бактерий (строка 3 таблицы 1). При написании работы учитывались результаты ранее проведенного исследования [3].

Цель исследования – изучение зависимости спектральных характеристик и параметров возбуждения и люминесценции молока при скисании.

## Обзор литературы

Физические методы диагностики широко применяются для контроля различных показателей качества молока и молочных продуктов. По диэлектрической проницаемости и коэффициенту диэлектрических потерь определяли содержание лактозы цельного и обезжиренного молока [4].

<sup>1</sup> Измайлов А. Ю., Цой Ю. А., Кирсанов В. В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм : моногр. М. : ИНФРА-М, 2019. 208 с.

<sup>2</sup> URL: <https://fsvps.gov.ru/fsvps-docs/ru/usefulinf/files/es854-2004.pdf> (дата обращения: 10.04.2022).

**Применяемые методы исследований молока в ЕС**  
**Applied methods of milk research in the EU**

| Показатели молока / Milk indicators                         | Методы / Methods  |
|---|---|
| Жир, белок, лактоза, мочевины / Fat, protein, lactose, urea | Метод Гербера (ISO 2446); метод Росе – Готлиба (ISO 1211); метод Къельдаля (ISO 8968); метод инфракрасного излучения (ISO 9622) / Gerber method (ISO 2446); Rose – Gottlieb method (ISO 1211); Kjeldahl method (ISO 8968); infrared radiation method (ISO 9622)                                 |
| Количество соматических клеток / Number of somatic cells    | Подсчет соматических клеток в молоке микроскопическим методом (ISO 13366-1); подсчет соматических клеток в молоке флуоресцентным методом (ISO 13366-3) / Counting somatic cells in milk by microscopic method (ISO 13366-1); counting somatic cells in milk by fluorescent method (ISO 13366-3) |
| Общее количество бактерий / Total number of bacteria        | Определение бактериальной обсемененности по подсчету колоний при 30 °C (ISO 4833) / Determination of bacterial infestation by colony count at 30°C (ISO 4833)   |
| Температура заморозания / Freezing temperature              | Метод термисторного криоскопа (ISO 5764) / Thermistor cryoscope method (ISO 5764)   |
| Ингибирующие вещества / Inhibitory substances               | Микробиологический метод / Microbiological method   |
| Хлорамфениколь / Chloramphenicol                            | Метод иммуноферментного анализа / Enzyme immunoassay method   |

Контролировали профили нелетучих метаболитов сырого молока посредством протонного ядерного магнитного резонанса [5]. С помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии находили тепловые показатели молока [6] и количество аскорбиновой кислоты в ней [7]. Остатки хлорорганических пестицидов в образцах пастеризованного и ультрапастеризованного молока определяли методом хромато-масс-спектрометрии [8]. Остатки антибиотиков (пенициллина G, ампициллина и тетрациклина) в цельном молоке определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии [9].

В молочной промышленности спектроскопия в ближней и средней инфракрасной области использовалась в качестве лабораторного аналитического метода для анализа состава молочных продуктов с 1970-х годов [10]. Так, например, в одной из работ было исследовано предсказание минералов

молока с помощью инфракрасных спектров в области 2,0–10,8 мкм [11]. Приборами среднего инфракрасного диапазона измеряли данные по жиру, белку, лактозе и концентрации азота мочевины в молоке [12]. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье использовалась для прогнозирования признаков, которые являются дорогостоящими и трудно поддающимися измерению у молочного скота (показатель упитанности,  $\beta$ -гидроксипутират к-казеин) [13]. Спектроскопические прогнозы биомаркеров в молоке может повысить точность геномного прогнозирования  $\beta$ -гидроксимасляной кислоты, жирных кислот и мочевины [14].

Спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона широко используется для определения различных характеристик состава многих молочных продуктов в промышленности. Данными методами прогнозируется химический состав большого количества

различных сыров [15–17]. Разработан способ, основанный на методах колебательной спектроскопии, для понимания биохимических изменений, происходящих в процессе созревания турецкого белого сыра, и для создания алгоритмов прогнозирования для определения содержания основных компонентов качества сыра и индикаторов созревания [18]. Образцы молока с известным подробным составом белка и данными о технологических признаках, сопровождаемые спектрами среднего инфракрасного диапазона, были доступны для оценки прогностической способности различных алгоритмов регрессии и классификации. Использование современных методов статистического машинного обучения для предсказания признаков с помощью спектроскопии среднего инфракрасного диапазона может повысить точность предсказания некоторых признаков [19]. Спектры среднего инфракрасного диапазона применяются для оценки свойств коагуляции и подкисления, а также характеристик выхода творога коровьего молока [20]. Средний инфракрасный спектр молока был предложен в качестве дополнительного источника информации для прогнозирования массы тела коров [21]. В другом исследовании сравнили четыре различных вида спектров (пропускание, отражение, поглощение и уменьшенное рассеяние) в ближней инфракрасной области для определения жира и белка молока [22].

Не менее информативной является фотолюминесцентная спектроскопия. Ранее люминесценция считалась фундаментальным методом изучения молекулярных свойств и функций структурных и биологически активных компонентов, поэтому ее применение к пищевым продуктам было ограничено. Затем с развитием современной недорогой приборной базы ее стали применять в мониторинге атрибутов

безопасности и качества пищевых продуктов во время обработки и хранения [23]. Исследован прототип датчика для мониторинга индуцированной сычужным ферментом коагуляции обезжиренного молока при различных концентрациях белка на основе профилей флуоресценции и обратного инфракрасного рассеяния при длинах волн 350 и 880 нм соответственно [24]. Спектроскопические исследования различных видов животного и растительного молока различного коммерческого происхождения подтвердили возможность использования рибофлавина для определения качества сортов молока путем измерения оптической плотности при 365 нм и интенсивности люминесценции около 520 нм (возбуждение при 365 нм) [25]. Количественное определение казеина в жидком молоке с различным соотношением казеина и сырого белка с использованием фронтальной флуоресцентной спектроскопии [26]. Поведение системы цельного молока (буйволиное, коровье и смешанное молоко), вызванное термодиссоциацией, было изучено методом стационарной флуоресцентной спектроскопии с использованием триптофана в качестве маркерной молекулы. Различное молекулярное окружение остатков триптофана в системах сырого молока проявляло различные флуоресцентные свойства [27].

#### **Материалы и методы**

Для измерений было взято питьевое пастеризованное молоко местной агрофирмы «Катынь» с массовой долей жира 3,2 %. После первых измерений молоко хранилось в темном помещении при комнатной температуре 20 °С. Условия хранения соответствовали техническому регламенту Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции» ТР ТС 033. Ежедневно перед сканированием молоко проверялось на скисание

органолептическим методом и тщательно перемешивалось.

Кислотность контролировали титриметрическим методом, который основан на нейтрализации кислот, содержащихся в продукте, раствором гидроксида натрия в присутствии индикатора фенолфталеина (по ГОСТу 3624-92)<sup>3</sup>. Допускаемая погрешность результата анализа при принятой доверительной вероятности  $P=0,95$  составляет для молока  $\pm 1,9$  °Т.

Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводили на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (производство фирмы «Льюэкс», Россия) с программным обеспечением RapogamaPro. Производили измерения спектральных характеристик возбуждения (поглощения)  $\eta_e(\lambda)$  в диапазоне 200–500 нм по методике, описанной в другой работе [28]. Повторность измерений десятикратная. Для измерения спектра люминесценции  $\varphi_l(\lambda)$  монохроматор возбуждения устанавливали на ту же длину волны, на которой наблюдается максимум спектра возбуждения при синхронном сканировании. Монохроматор регистрации люминесценции сканирует более длинноволновую область. Все спектры были скорректированы на инструментальные искажения возбуждения с помощью программных средств RapogamaPro. По полученным спектральным характеристикам определяли интегральную поглощательную способность  $H$  по формуле:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$\eta_e(\lambda)$  – спектральная характеристика возбуждения;  $\lambda_1, \lambda_2$  – границы спектрального диапазона возбуждения.

Интегральные параметры спектров  $\varphi_l(\lambda)$ , являющиеся потоками фотолюминесценции  $\Phi$ , определяли по формуле:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_l(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $\varphi_l(\lambda)$  – спектральная характеристика фотолюминесценции;  $\lambda_1, \lambda_2$  – границы спектрального диапазона фотолюминесценции.

Представленная ниже методика расчетов статистических параметров была применена ранее в диссертационном исследовании одного из соавторов М. В. Белякова<sup>4</sup>. Математическое ожидание (среднее значение)  $M_\lambda$  определяется по формуле:

$$M_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где  $\varphi(\lambda)$  – распределение плотности вероятности;  $\lambda_1, \lambda_2$  – минимальное и максимальное значение длин волн диапазона измерений фотолюминесценции.

Вычисление данного и последующих статистических параметров проводили в программе Microcal Origin.

Дисперсия  $\sigma^2$  находится по формуле:

$$\sigma^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^2 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Числовой характеристикой асимметричности является центральный статистический момент 3-го порядка  $\mu_3$ :

$$\mu_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^3 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

На практике для оценки асимметричности используют коэффициент асимметрии  $As$ :

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (6)$$

<sup>3</sup> ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. М. : Стандартиформ, 2009. 9 с.

<sup>4</sup> Беляков М. В. Люминесцентный метод и оптико-электронные устройства экспресс-диагностики качества семян агрокультур : дис. ... д-ра техн. наук. Смоленск, 2020. 438 с.

При правосторонней асимметрии  $As > 0$ , при левосторонней симметрии  $As < 0$ . Числовой характеристикой крутизны спектра служит оценка центрального статического момента 4-го порядка  $\mu_4$ :

$$\mu_4 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

На практике за оценку коэффициента крутизны принимают искусственно созданную величину, которую назвали эксцессом  $E_\lambda$ :

$$E_\lambda = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (8)$$

Для получения уравнения числовой характеристики энергии фотолюминесценции следует учитывать то, что каждый фотон фотолюминесценции обладает энергией, связанной с длиной волны излучения соотношением

$$E_{ph} = \frac{1240}{\lambda}, \quad (9)$$

где  $E_{ph}$  измеряется в эВ, а  $\lambda$  – в нм. Если известна дифференциальная функция распределения  $\varphi(\lambda)$ , то полная энергия спектра в диапазоне длин волн находится как:

$$E = 1240 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda} \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

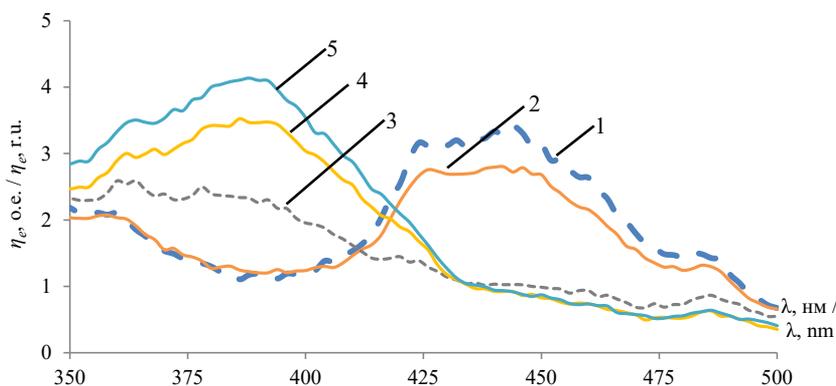
### Результаты исследования

В течение пяти суток измеряли спектры возбуждения. На четвертый и пятый день спектры возбуждения, кроме количественных изменений в диапазоне 230–350 нм, имели качественные изменения в диапазоне 350–500 нм (рис. 1). В целом при увеличении кислотности молока спектры возбуждения уменьшаются, при этом наблюдаются несколько пиков на длинах волн примерно 234, 262, 271, 287, 322 и 442 нм. На четвертый день появляется новый максимум примерно на 385 нм.

Результаты расчетов интегральных параметров спектров возбуждения по формуле (1) представлены в таблице 2.

Относительная погрешность определения интегральной поглощательной способности  $H$  молока составляет менее 5 % для надежности 0,95.

Интегральная поглощательная способность молока во всем диапазоне 200–500 нм не является информативной, поскольку количественные изменения происходят в диапазонах 220–340 нм, а также 350–500 нм. Зависимость интегральной поглощательной способности  $H$  в диапазоне 220–340 нм от времени скисания представлена на рисунке 2.

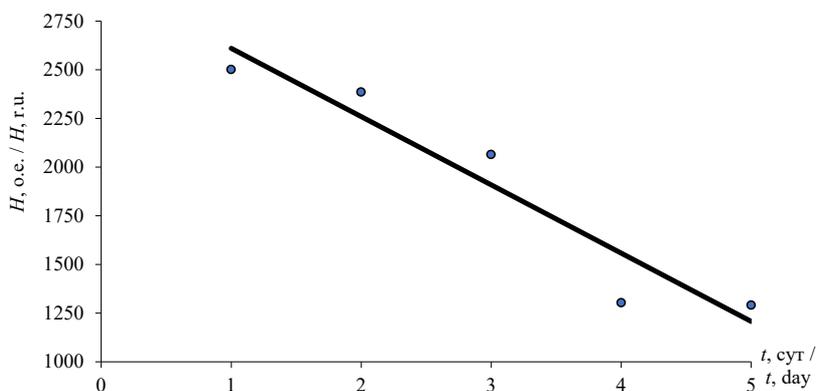


Р и с. 1. Спектральные характеристики возбуждения молока в диапазоне 350–500 нм: 1 – 1 день; 2 – 2 день; 3 – 3 день; 4 – 4 день; 5 – 5 день

F i g. 1. Spectral characteristics of milk excitation of various souring degrees in the range of 350–500 nm: 1 – 1 day; 2 – 2 day; 3 – 3 day; 4 – 4 day; 5 – 5 day

**Интегральные параметры спектров возбуждения молока различной степени скисания**  
**Integral parameters of the excitation spectra of milk of various souring degrees**

| Сутки /<br>Day | $H$ , о. е. / $H$ , r. u. | $H$ , о. е. (для спектрального диапазона, нм) /<br>$H$ , r. u. (for the spectral range, nm) |              |             |             |
|----------------|---------------------------|---|--------------|-------------|-------------|
|                |                           | 220–340   | 350–500      | 356–420     | 420–500     |
| 1              | $2\,823 \pm 108$          | $2\,501 \pm 136$  | $294 \pm 11$ | $97 \pm 3$  | $184 \pm 5$ |
| 2              | $2\,676 \pm 84$           | $2\,385 \pm 95$   | $267 \pm 6$  | $98 \pm 3$  | $157 \pm 4$ |
| 3              | $2\,315 \pm 112$          | $2\,064 \pm 61$   | $223 \pm 8$  | $136 \pm 4$ | $73 \pm 3$  |
| 4              | $1\,600 \pm 82$           | $1\,303 \pm 54$   | $270 \pm 13$ | $190 \pm 9$ | $66 \pm 2$  |
| 5              | $1\,626 \pm 62$           | $1\,290 \pm 70$   | $306 \pm 6$  | $221 \pm 8$ | $65 \pm 3$  |



Р и с. 2. Интегральная поглощательная способность молока для диапазона 220–340 нм от времени скисания  $t$

F i g. 2. Integral absorption capacity of milk for the range 220–340 nm from the souring time  $t$

Коэффициент детерминации  $R^2$  при линейной аппроксимации равен 0,91, то есть аппроксимация является достоверной. Уравнение аппроксимации:

$$H = -350t + 2\,960. \quad (11)$$

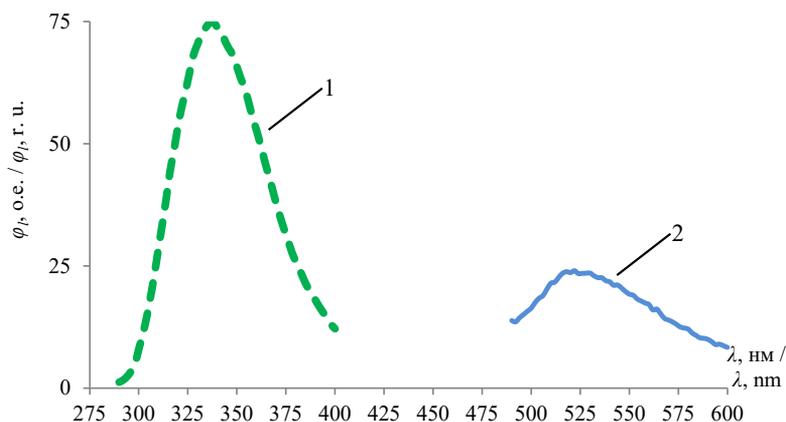
Спектральный диапазон 350–500 нм является интересным из-за качественного изменения характеристик возбуждения, хотя абсолютный уровень фотосигнала почти на порядок меньше.

В те же временные сроки измеряли спектры фотолюминесценции при возбуждении излучением с длинами волн 262, 385 и 442 нм. На рисунке 3

представлены характеристики для возбуждения 262 и 442 нм.

Результаты расчета интегральных потоков фотолюминесценции, полученных по формуле (2), представлены в таблице 3.

Поток фотолюминесценции при возбуждении излучением с  $\lambda_e = 262$  нм уменьшается с течением времени, особенно в первые три дня (на 26 %). Затем идет стабилизация с небольшим увеличением. Поток фотолюминесцентного излучения при возбуждении  $\lambda_e = 385$  нм, наоборот, увеличивается за первые трое суток на 19 %, после чего на четвертые сутки наступает стабилизация параметров. Фотолюминесцентный поток при



Р и с. 3. Спектральные характеристики люминесценции молока: 1 – для  $\lambda_e = 262$  нм (при средней чувствительности приемника излучения); 2 – для  $\lambda_e = 442$  нм (при высокой чувствительности приемника излучения)

F i g. 3. Spectral characteristics of milk luminescence: 1 – for  $\lambda_e = 262$  nm (with medium sensitivity of the radiation receiver); 2 – for  $\lambda_e = 442$  nm (with high sensitivity of the radiation receiver)

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

**Интегральные параметры спектров люминесценции молока различной степени скисания**  
**Integral parameters of the luminescence spectra of milk of various souring degrees**

| Сутки / Day | $t, ч / t, h$ | $\Phi_{262}, \text{о. е.} / \Phi_{262}, \text{г. у.}$ | $\Phi_{385}, \text{о. е.} / \Phi_{385}, \text{г. у.}$ | $\Phi_{442}, \text{о. е.} / \Phi_{442}, \text{г. у.}$ |
|-------------|---------------|---|---|---|
| 1           | 0             | $4\,414 \pm 127$                                      | $78 \pm 4$  | $184 \pm 3$   |
|             | 5,5           | $4\,106 \pm 125$                                      | $78 \pm 2$  | $191 \pm 7$   |
| 2           | 21,5          | $3\,931 \pm 68$                                       | $79 \pm 4$  | $187 \pm 6$   |
|             | 28,5          | $3\,527 \pm 84$                                       | $84 \pm 4$  | $148 \pm 5$   |
| 3           | 42,5          | $3\,490 \pm 156$                                      | $92 \pm 4$  | $180 \pm 7$   |
|             | 46,5          | $3\,820 \pm 58$                                       | $93 \pm 4$  | $178 \pm 7$   |
| 4           | 71,5          | $3\,829 \pm 46$                                       | $91 \pm 4$  | $176 \pm 4$   |
|             | 74,5          | $3\,650 \pm 101$                                      | $84 \pm 4$  | $175 \pm 5$   |

$\lambda_e = 442$  нм уменьшается незначительно (на 3 %), и уменьшение имеет несистемный характер.

Для анализа спектров определяли их статистические параметры: математическое ожидание, дисперсию, статистические моменты третьего и четвертого порядка, асимметрию, эксцесс, энергию спектра<sup>5</sup>. Результаты представлены в таблицах 4, 5.

В отличие от потока  $\Phi$  статистические параметры  $M_\lambda, \sigma^2, \mu_3, \mu_4, As, E_\lambda$  и энергия спектра  $E$  со временем меняются несистемно, хаотично и зачастую незначительно. Сравнивая данные таблиц 4 и 5, следует отметить, что при несистемности измененный разброс значений  $\mu_3$  и  $As$  для  $\lambda_e = 442$  нм существенно (в 2,1–2,4 раза) больше, чем для  $\lambda_e = 262$  нм. То же

<sup>5</sup> Зиенко С. И., Беляков М. В., Малышкин В. В. Новые методы и средства спектрально-люминесцентного анализа семян растений : моногр. Смоленск : Универсум, 2020. 184 с.

наблюдается для  $\sigma^2$ ,  $\mu_4$ ,  $E_i$ , но в меньшей степени.

Статистические параметры и энергия спектров фотолюминесценции не информативны для контроля кислотности молока.

Параллельно со спектральными измерениями определяли кислотность молока. Результаты определения кислотности молока ( $K$ ) титриметрическим методом представлены в таблице 6.

Таблица 4

Table 4

**Параметры спектров люминесценции молока при  $\lambda_e = 262$  нм**

**Parameters of milk luminescence spectra at  $\lambda_e = 262$  nm**

| Сутки / Day | $t$ , ч / $t$ , h | $M_{\lambda}$ , нм / $M_{\lambda}$ , nm | $\sigma^2$ | $\mu_3$ | $\mu_4$           | $A_s$ | $E_i$ | $E$ , эВ / $E$ , eV |
|-------------|-------------------|---|------------|---------|-------------------|-------|-------|---------------------|
| 1           | 0                 | 342                                     | 406        | 1 946   | $4,14 \cdot 10^5$ | 0,24  | -0,49 | 3,64                |
|             | 5,5               | 342                                     | 403        | 2 127   | $4,08 \cdot 10^5$ | 0,26  | -0,49 | 3,64                |
| 2           | 21,5              | 342                                     | 403        | 1 978   | $4,08 \cdot 10^5$ | 0,24  | -0,49 | 3,64                |
|             | 28,5              | 342                                     | 405        | 2 176   | $4,15 \cdot 10^5$ | 0,26  | -0,47 | 3,64                |
| 3           | 42,5              | 341                                     | 408        | 2 062   | $4,19 \cdot 10^5$ | 0,25  | -0,48 | 3,65                |
|             | 46,5              | 341                                     | 408        | 2 171   | $4,21 \cdot 10^5$ | 0,26  | -0,47 | 3,65                |
| 4           | 71,5              | 341                                     | 410        | 1 949   | $4,23 \cdot 10^5$ | 0,23  | -0,48 | 3,65                |
|             | 74,5              | 341                                     | 407        | 1 755   | $4,15 \cdot 10^5$ | 0,21  | -0,50 | 3,65                |

Таблица 5

Table 5

**Параметры спектров люминесценции молока при  $\lambda_e = 442$  нм**

**Parameters of milk luminescence spectra at  $\lambda_e = 442$  nm**

| Сутки / Day | $t$ , ч / $t$ , h | $M_{\lambda}$ , нм / $M_{\lambda}$ , nm | $\sigma^2$ | $\mu_3$ | $\mu_4$           | $A_s$ | $E_i$ | $E$ , эВ / $E$ , eV |
|-------------|-------------------|---|------------|---------|-------------------|-------|-------|---------------------|
| 1           | 0                 | 537                                     | 469        | 2 935   | $5,34 \cdot 10^5$ | 0,29  | -0,57 | 2,30                |
|             | 5,5               | 537                                     | 458        | 1 832   | $4,85 \cdot 10^5$ | 0,19  | -0,69 | 2,32                |
| 2           | 21,5              | 537                                     | 496        | 4 581   | $6,05 \cdot 10^5$ | 0,41  | -0,54 | 2,31                |
|             | 28,5              | 536                                     | 452        | 4 071   | $5,07 \cdot 10^5$ | 0,42  | -0,52 | 2,31                |
| 3           | 42,5              | 536                                     | 488        | 5 327   | $6,05 \cdot 10^5$ | 0,49  | -0,46 | 2,31                |
|             | 46,5              | 536                                     | 487        | 4 862   | $6,05 \cdot 10^5$ | 0,45  | -0,45 | 2,31                |
| 4           | 71,5              | 537                                     | 464        | 3 467   | $5,39 \cdot 10^5$ | 0,35  | -0,50 | 2,31                |
|             | 74,5              | 536                                     | 459        | 3 918   | $5,24 \cdot 10^5$ | 0,40  | -0,51 | 2,31                |

Таблица 6

Table 6

**Кислотность молока  $K$  при различном времени хранения, °Т**

**Milk acidity  $K$  at different storage times, °Т**

| Проба / Sample    | 1 день (0 часов) / 1 day (0 hours) | 2 день (21,5 часа) / 2 day (21.5 hours) | 3 день (42,5 часа) / 3 day (42.5 hours) | 4 день (71,5 часа) / 4 day (71.5 hours) |
|-------------------|------------------------------------|---|---|---|
| 1                 | 19                                 | 24                                      | 99                                      | 117                                     |
| 2                 | 17                                 | 23                                      | 100                                     | 115                                     |
| 3                 | 17                                 | 22                                      | 98                                      | 116                                     |
| Среднее / Average | $18 \pm 1,9$                       | $23 \pm 1,7$                            | $99 \pm 1,7$                            | $116 \pm 1,7$                           |

Зависимости потоков фотолюминесценции от кислотности были аппроксимированы линейными регрессионными моделями. Для  $\lambda_e = 262$  нм коэффициент детерминации  $R^2$  был равен 0,55, то есть модель статистически недостоверна. Статистически достоверны линейные модели для  $\lambda_e = 385$  нм и  $\lambda_e = 442$  нм, для которых коэффициенты детерминации равны 0,96 и 0,87 соответственно.

Для повышения чувствительности метода целесообразно измерять не абсолютное значение потока, а их соотношение  $\Phi_{385} / \Phi_{442}$ . При практической реализации это уменьшит влияние флуктуаций абсолютных величин потоков фотолюминесценции. Зависимость  $\Phi_{385} / \Phi_{442} (K)$  представлена на рисунке 4.

Коэффициент детерминации данной зависимости равен 0,99.

Для определения кислотности молока необходима обратная зависимость  $K(\Phi)$ :

$$K = 961 \frac{\Phi_{385}}{\Phi_{442}} - 386. \quad (12)$$

### Обсуждение и заключение

Очевидно, что химическая реакция

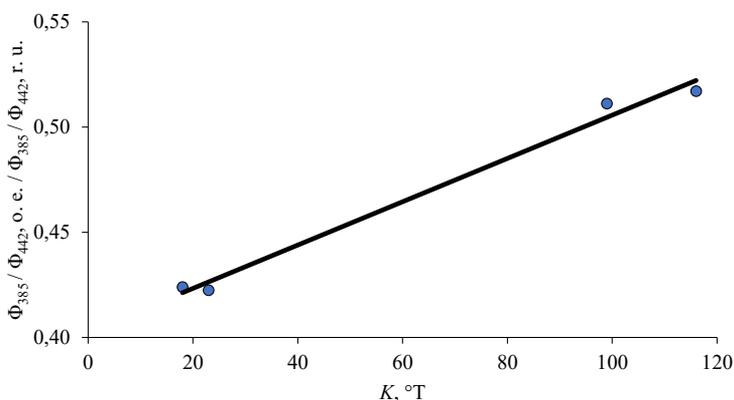


вызывала изменение люминесцентных свойств, и это изменение можно использовать в качестве маркера скисания молочных продуктов. Изменения люминесцентных характеристик и параметров молока при изменении кислотности могут быть связаны с изменением концентрации молочной кислоты. Интенсивность люминесценции  $I_{л}$  пропорциональна квантовому выходу люминесценции  $\eta_3$ , интенсивности возбуждающего света  $I_0$ , коэффициенту поглощения при длине волны возбуждения  $\epsilon$ , длине слоя  $l$  и концентрации люминесцирующего вещества  $c_{л}$ :

$$I_{л} = 2,3 I_0 \epsilon l c_{л} \eta_3. \quad (13)$$

Это уравнение является математическим основанием количественного люминесцентного анализа<sup>6</sup>.

В процессе скисания характеристики возбуждения снижаются в диапазоне 220–340 нм, при этом интегральная поглощательная способность уменьшается примерно в два раза. В диапазоне 350–500 нм происходят качественные изменения: уменьшение в диапазоне 420–500 нм и увеличение в диапазоне 356–420 нм.



Р и с. 4. Зависимость отношения потоков излучения  $\Phi_{385} / \Phi_{442}$  от кислотности молока

F i g. 4. Dependence of radiation flux ratio  $\Phi_{385} / \Phi_{442}$  on milk acidity

<sup>6</sup> Беляков М. В. Люминесцентный метод и оптико-электронные устройства...

Для создания метода контроля показателей качества молока при скисании наиболее информативным является использование длин волн возбуждения 385 и 442 нм с последующей регистрацией фотолюминесценции в диапазонах 440–490 и 490–600 нм соответственно. Для длины волны 262 нм зависимость  $\Phi_{\lambda}(K)$  является статистически достоверной. Статистические параметры спектров фотолюминесценции

меняются при скисании незначительно и несистемно и для диагностики молока не могут быть использованы.

Диапазон применения фотолюминесцентного метода определения кислотности составляет от 17 до 116 °С и может быть даже выше, в отличие от традиционных методов (титриметрического, рН-метрии), которые сильно зависят от консистенции скисшего молока.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15, № 4. С. 6–10. doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
2. Optimization of Power and Economic Indexes of a Farm for the Maintenance of Cattle / G. N. Samarin [et al.] // *Intelligent Computing and Optimization*. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing ; Ed. by P. Vasant, I. Zelinka, G. W. Weber. Vol. 1072. Cham : Springer, 2019. P. 679–689. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_66)
3. Identification of Organic Matter Dispersions Based on Light Scattering Matrices Focusing on Soil Organic Matter Management / N. F. Bunkin [et al.] // *ACS Omega*. 2021. Vol. 5, Issue 51. P. 33214–33224. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04906>
4. Liu Q., Guo W., Zhu X. Effect of Lactose Content on Dielectric Properties of Whole Milk and Skim Milk // *International Journal of Food Science & Technology*. 2018. Vol. 53, Issue 9. P. 2037–2044. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13790>
5. Comparative Metabolite Profiling of Raw Milk from Subclinical and Clinical Mastitis Cows Using <sup>1</sup>H-NMR Combined with Chemometric Analysis / M. Luangwilai [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2021. Vol. 56, Issue 1. P. 493–503. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14665>
6. Morales F.-J., Romero C., Jiménez-Pérez S. Characterization of Industrial Processed Milk by Analysis of Heat-Induced Changes // *International Journal of Food Science & Technology*. 2000. Vol. 35, Issue 2. P. 193–200. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00334.x>
7. Development of an Improved Extraction and HPLC Method for the Measurement of Ascorbic Acid in Cows' Milk from Processing Plants and Retail Outlets / N. Chotyakul [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2014. Vol. 49, Issue 3. P. 679–688. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12350>
8. Determination of Organochlorine Pesticide Residues in Pasteurized and Sterilized Milk Using QuEChERS Sample Preparation Followed by Gas Chromatography–Mass Spectrometry [Электронный ресурс] / C. Özdemir [et al.] // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019. Vol. 43, Issue 11. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14173>
9. Yildiz Ö., Unluturk S. Differential Scanning Calorimetry as a Tool to Detect Antibiotic Residues in Ultra High Temperature Whole Milk // *International Journal of Food Science & Technology*. 2009. Vol. 44, Issue 12. P. 2577–2582. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02087.x>
10. Review of Near-Infrared Spectroscopy as a Process Analytical Technology for Real-Time Product Monitoring in Dairy Processing [Электронный ресурс] / Y.-Y. Pu [et al.] // *International Dairy Journal*. 2020. Vol. 103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104623>
11. Genetic Analysis on Infrared-Predicted Milk Minerals for Danish Dairy Cattle / R. M. Zaalberg [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 8. P. 8947–8958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19638>

12. Portnoy M., Coon C., Barbano D. M. Infrared Milk Analyzers: Milk Urea Nitrogen Calibration // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 7. P. 7426–7437. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18772>
13. Evaluating the Performance of Machine Learning Methods and Variable Selection Methods for Predicting Difficult-to-Measure Traits in Holstein Dairy Cattle Using Milk Infrared Spectral Data / L. F. M. Mota [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 7. P. 8107–8121. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19861>
14. The Use of Milk Mid-Infrared Spectroscopy to Improve Genomic Prediction Accuracy of Serum Biomarkers / I. van den Berg [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 2. P. 2008–2017. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19468>
15. Accuracy and Biases in Predicting the Chemical and Physical Traits of Many Types of Cheeses Using Different Visible and Near-Infrared Spectroscopic Techniques and Spectrum Intervals / G. Stocco [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 102, Issue 11. P. 9622–9638. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16770>
16. Effectiveness of Two Different at-Line Instruments for the Assessment of Cheese Composition, Major Minerals and Fatty Acids Content [Электронный ресурс] / M. Franzoi [et al.] // *International Dairy Journal*. 2021. Vol. 123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105184>
17. Infrared Spectroscopy Combined with Chemometrics as a Convenient Method to Detect Adulterations in Cooking/Stretching Process in Commercial Cheese [Электронный ресурс] / M. Ozturk [et al.] // *International Dairy Journal*. 2022. Vol. 128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105312>
18. Monitoring the Ripening Attributes of Turkish White Cheese Using Miniaturized Vibrational Spectrometers / H. Yaman [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105, Issue 1. P. 40–55. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20313>
19. Predicting Cow Milk Quality Traits from Routinely Available Milk Spectra Using Statistical Machine Learning Methods / M. Frizzarin [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 7. P. 7438–7447. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19576>
20. Comparison of Bayesian and Partial Least Squares Regression Methods for Mid-Infrared Prediction of Cheese-Making Properties in Montbéliarde Cows / M. El Jabri [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 102, Issue 8. P. 6943–6958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16320>
21. Mining Data from Milk Mid-Infrared Spectroscopy and Animal Characteristics to Improve the Prediction of Dairy Cow's Liveweight Using Feature Selection Algorithms Based on Partial Least Squares and Elastic Net Regressions [Электронный ресурс] / L. Zhang [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106106>
22. He X., Fu X., Rao X. Model Robustness Improvement by Absorption and Reduced Scattering Spectra in Short Wave Near Infrared Spectral Region // *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 176. P. 114–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.013>
23. Colaruotolo L. A., Peters E., Corradini M. G. Novel Luminescent Techniques in Aid of Food Quality, Product Development, and Food Processing // *Current Opinion in Food Science*. 2021. Vol. 42. P. 148–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.005>
24. Investigation of an in-Line Prototype Fluorescence and Infrared Backscatter Sensor to Monitor Rennet-Induced Coagulation of Skim Milk at Different Protein Concentrations / B. Panikuttira [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2020. Vol. 55, Issue 1. P. 175–182. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14267>
25. Spectroscopy of an Intrinsic Fluorophore in Animal and Plant Milk for Potential Identification of Their Quality / L. Roy [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103, Issue 2. P. 1366–1376. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17034>
26. Ma Y. B., Amamcharla J. K. A Rapid Method to Quantify Casein in Fluid Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy Combined with Chemometrics // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 1. P. 243–252. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799>
27. Investigation of Heat-Acid Induced Coagulation Behaviour of Whole Milk Systems Employing Front-Face Fluorescence Spectroscopy / P. Chakraborty [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2020. Vol. 73, Issue 4. P. 674–682. doi: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12726>

28. Belyakov M. V., Kulikova M. G., Gerts A. A. Control of Powdery Contents and Mass Rates of the Extract in the Dry Substance of Barley Malt by Photoluminescent Method // *International Journal of Food Science & Technology*. 2022. Vol. 57, Issue 1. P. 408–415. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15398>

*Поступила 13.04.2022; одобрена после рецензирования 18.05.2022; принята к публикации 30.05.2022*

*Об авторах:*

**Беляков Михаил Владимирович**, ведущий научный сотрудник лаборатории переработки сельскохозяйственной продукции Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

**Самарин Геннадий Николаевич**, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией переработки сельскохозяйственной продукции Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4972-8647>, Researcher ID: AAS-6885-2020, [samaringn@yandex.ru](mailto:samaringn@yandex.ru)

**Кудрявцев Александр Алексеевич**, научный сотрудник лаборатории переработки сельскохозяйственной продукции Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6122-0168>, Researcher ID: ABB-4048-2021, [kudralex94@yandex.ru](mailto:kudralex94@yandex.ru)

**Ефременков Игорь Юрьевич**, студент Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, [matiusharius@mail.ru](mailto:matiusharius@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

М. В. Беляков – анализ литературных данных, описание методов и способа предварительной обработки, редактирование текста, составление выводов и заключения.

Г. Н. Самарин – научное руководство, формирование структуры статьи, доработка начального текста, составление выводов и заключения.

А. А. Кудрявцев – проведение измерений и расчетов.

И. Ю. Ефременков – проведение измерений и расчетов, подготовка начального варианта текста и иллюстраций.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Lobachevskiy Y.P., Dorokhov A.S. Digital Technologies and Robotic Devices in the Agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

2. Samarina G.N., Vasilyev A.N., Dorokhov A.S., et al. Optimization of Power and Economic Indexes of a Farm for the Maintenance of Cattle. In: Vasant P., Zelinka I., Weber G.W. (eds.) *Intelligent Computing and Optimization*. ICO 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1072. Cham: Springer; 2019. p. 679–689. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_66)

3. Bunkin N.F., Glinushkin A.P., Shkirin A.V., et al. Identification of Organic Matter Dispersions Based on Light Scattering Matrices Focusing on Soil Organic Matter Management. *ACS Omega*. 2021;5(51):33214–33224. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04906>

4. Liu Q., Guo W., Zhu X. Effect of Lactose Content on Dielectric Properties of Whole Milk and Skim Milk. *International Journal of Food Science & Technology*. 2018;53(9):2037–2044. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13790>

5. Luangwilai M., Duangmal K., Chantapasarn N., Settachaimongkon S. Comparative Metabolite Profiling of Raw Milk from Subclinical and Clinical Mastitis Cows Using <sup>1</sup>H-NMR Combined with Chemometric Analysis. *International Journal of Food Science & Technology*. 2021;56(1):493–503. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14665>
6. Morales F.-J., Romero C., Jiménez-Pérez S. Characterization of Industrial Processed Milk by Analysis of Heat-Induced Changes. *International Journal of Food Science & Technology*. 2000;35(2):193–200. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00334.x>
7. Chotyakul N., Pateiro-Moure M., Martínez-Carballo E., et al. Development of an Improved Extraction and HPLC Method for the Measurement of Ascorbic Acid in Cows' Milk from Processing Plants and Retail Outlets. *International Journal of Food Science & Technology*. 2014;49(3):679–688. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12350>
8. Özdemir C., Özdemir S., Oz E., Oz F. Determination of Organochlorine Pesticide Residues in Pasteurized and Sterilized Milk Using QuEChERS Sample Preparation Followed by Gas Chromatography–Mass Spectrometry. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019;43(11). doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14173>
9. Yıldız Ö., Unluturk S. Differential Scanning Calorimetry as a Tool to Detect Antibiotic Residues in Ultra High Temperature Whole Milk. *International Journal of Food Science & Technology*. 2009;44(12):2577–2582. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02087.x>
10. Pu Y.-Y., O'Donnell C., Tobin J.T., O'Shea N. Review of Near-Infrared Spectroscopy as a Process Analytical Technology for Real-Time Product Monitoring in Dairy Processing. *International Dairy Journal*. 2020;103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104623>
11. Zaalberg R.M., Poulsen N.A., Bovenhuis H., et al. Genetic Analysis on Infrared-Predicted Milk Minerals for Danish Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(8):8947–8958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19638>
12. Portnoy M., Coon C., Barbano D.M. Infrared Milk Analyzers: Milk Urea Nitrogen Calibration. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):7426–7437. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18772>
13. Mota L.F.M., Pego S., Baba T., et al. Evaluating the Performance of Machine Learning Methods and Variable Selection Methods for Predicting Difficult-to-Measure Traits in Holstein Dairy Cattle Using Milk Infrared Spectral Data. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):8107–8121. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19861>
14. Van den Berg I., Ho P.N., Luke T.D.W., et al. The Use of Milk Mid-Infrared Spectroscopy to Improve Genomic Prediction Accuracy of Serum Biomarkers. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(2):2008–2017. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19468>
15. Stocco G., Cipolat-Gotet C., Ferragina A., et al. Accuracy and Biases in Predicting the Chemical and Physical Traits of Many Types of Cheeses Using Different Visible and Near-Infrared Spectroscopic Techniques and Spectrum Intervals. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(11):9622–9638. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16770>
16. Franzoi M., Ghetti M., De Lorenzi C., De Marchi M. Effectiveness of Two Different at-Line Instruments for the Assessment of Cheese Composition, Major Minerals and Fatty Acids Content. *International Dairy Journal*. 2021;123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105184>
17. Ozturk M., Dogan M.A., Menevseoglu A., Ayvaz H. Infrared Spectroscopy Combined with Chemometrics as a Convenient Method to Detect Adulterations in Cooking/Stretching Process in Commercial Cheese. *International Dairy Journal*. 2022;128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105312>
18. Yaman H., Aykas D.P., Jiménez-Flores R., Rodríguez-Saona L.E. Monitoring the Ripening Attributes of Turkish White Cheese Using Miniaturized Vibrational Spectrometers. *Journal of Dairy Science*. 2022;105(1):40–55. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20313>
19. Frizzarin M., Gormley I.C., Berry D.P., et al. Predicting Cow Milk Quality Traits from Routinely Available Milk Spectra Using Statistical Machine Learning Methods. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):7438–7447. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19576>
20. El Jabri M., Sanchez M.-P., Trossat P., et al. Comparison of Bayesian and Partial Least Squares Regression Methods for Mid-Infrared Prediction of Cheese-Making Properties in Montbéliarde Cows. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(8):6943–6958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16320>

21. Zhang L., Tedde A., Ho P., et al. Mining Data from Milk Mid-Infrared Spectroscopy and Animal Characteristics to Improve the Prediction of Dairy Cow's Liveweight Using Feature Selection Algorithms Based on Partial Least Squares and Elastic Net Regressions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106106>
22. He X., Fu X., Rao X. Model Robustness Improvement by Absorption and Reduced Scattering Spectra in Short Wave Near Infrared Spectral Region. *Biosystems Engineering*. 2018;176:114–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.013>
23. Colaruotolo L.A., Peters E., Corradini M.G. Novel Luminescent Techniques in Aid of Food Quality, Product Development, and Food Processing. *Current Opinion in Food Science*. 2021;42:148–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.005>
24. Panikuttira B., Payne F.A., O'Shea N., et al. Investigation of an in-Line Prototype Fluorescence and Infrared Backscatter Sensor to Monitor Rennet-Induced Coagulation of Skim Milk at Different Protein Concentrations. *International Journal of Food Science & Technology*. 2020;55(1):175–182. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14267>
25. Roy L., Halder A., Singh S., et al. Spectroscopy of an Intrinsic Fluorophore in Animal and Plant Milk for Potential Identification of Their Quality. *Journal of Dairy Science*. 2020;103(2):1366–1376. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17034>
26. Ma Y.B., Amamcharla J.K. A Rapid Method to Quantify Casein in Fluid Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy Combined with Chemometrics. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(1):243–252. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799>
27. Chakraborty P., Bhattacharya B., Shivhare U., Basu S. Investigation of Heat-Acid Induced Coagulation Behaviour of Whole Milk Systems Employing Front-Face Fluorescence Spectroscopy. *International Journal of Dairy Technology*. 2020;73(4):674–682. doi: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12726>
28. Belyakov M.V., Kulikova M.G., Gerts A.A. Control of Powdery Contents and Mass Rates of the Extract in the Dry Substance of Barley Malt by Photoluminescent Method. *International Journal of Food Science & Technology*. 2022;57(1):408–415. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15398>

*Submitted 13.04.2022; approved after reviewing 18.05.2022; accepted for publication 30.05.2022*

*About the authors:*

**Mikhail V. Belyakov**, Senior Researcher at the Agricultural Products Processing Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: [ABB-2684-2020](https://orcid.org/0000-0002-4371-8042), [bmw20100@mail.ru](mailto:bmw20100@mail.ru)

**Gennady N. Samarin**, Chief Researcher, Head of the Agricultural Products Processing Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4972-8647>, Researcher ID: [AAS-6885-2020](https://orcid.org/0000-0002-4972-8647), [samaringn@yandex.ru](mailto:samaringn@yandex.ru)

**Alexander A. Kudryavtsev**, Researcher at the Agricultural Products Processing Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6122-0168>, Researcher ID: [ABB-4048-2021](https://orcid.org/0000-0002-6122-0168), [kudralex94@yandex.ru](mailto:kudralex94@yandex.ru)

**Igor Yu. Efremkov**, Student of the Moscow Power Engineering Institute (14 Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: [AGR-5540-2022](https://orcid.org/0000-0003-2302-9773), [matiusharius@mail.ru](mailto:matiusharius@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

M. V. Belyakov – analyzing literary data, describing the methods and way of preliminary processing, editing the text, drawing the conclusions.

G. N. Samarin – scientific guidance, forming the structure of the article, finalizing the initial text, drawing the conclusions.

A. A. Kudryavtsev – making measurements and calculations.

I. Yu. Efremkov – making measurements and calculations, preparing the initial version of the text and illustrations.

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

### Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки (по состоянию на 20.07.2022 г.):

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

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

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

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

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и CrossCheck.

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Материалы и методы (Materials and Methods);

3) Результаты исследования (Results);

4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

*Приводится на русском и английском языках.*

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности**. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список использованных источников** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад соавторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

#### 10. **Техническое оформление.**

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением ВОАИ открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

**Information for authors and readers of the journal**

*Engineering Technologies and Systems* journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as at 20 July 2022):

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and CrossCheck systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

*The title should be written in Russian and English.*

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Materials and Methods;

3) Results;

4) Discussion and Conclusion.

*The abstract should be written in Russian and English.*

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

*Keywords should be written in Russian and English.*

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

*Acknowledgements should be written in Russian and English.*

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) Introduction. It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) Literature Review. It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) Materials and Methods. This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) Results. This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

*References should be written in Russian and English.*

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

*Information about the authors should be written in Russian and English.*

9. **Contribution of the authors.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

*Contribution of the authors should be written in Russian and English.*

#### 10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizability. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

*Engineering Technologies and Systems* is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levitsev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Svetlana V. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редактор – *А. Д. Карпов*  
Перевод *С. В. Голованова, Н. Н. Плеханковой*  
Компьютерная верстка *Е. П. Гординой*  
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 16.09.2022 г. Дата выхода в свет 30.09.2022 г.

Формат  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 12,35.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 250 экз. Заказ № 911. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24  
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»)



Editor *A. D. Karpov*  
Translation *S. V. Golovanov, N. N. Plekhankova*  
Desktop publishing *E. P. Gordina*  
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 16.09.2022. Date of publishing 30.09.2022.

Sheet size  $70 \times 100 \frac{1}{16}$ . Conventional printed sheets 12.35.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 250 copies. Order no. 911. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation  
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)