

ISSN 2658-4123
eISSN 2658-6525

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

2024

Том 34, № 3
Vol. 34, no. 3

DOI: 10.15507/2658-4123

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402

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

Том 34, № 3. 2024

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

16+



Vol. 34, no. 3. 2024

SCIENTIFIC JOURNAL
Founded in January 1990
Periodicity:
Quarterly

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ENGINEERING TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

doi: 10.15507/2658-4123

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

Предыдущее название (до 2019 года):
Вестник Мордовского университета

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

The previous name until beginning of 2019:
Mordovia University Bulletin

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

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

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

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef

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

Подписной индекс – **70539**

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

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

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

Инженерные технологии и системы

рецензируемый научный журнал открытого доступа

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

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

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

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

Распространение – Российская Федерация, зарубежные страны.

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется в базах данных:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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





Engineering Technologies and Systems

A peer-reviewed open access academic journal

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

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

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

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

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

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

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

The journal is indexed and archived by databases:

Web of Science Core Collection (ESCI)

Russian Index of Science Citation

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

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



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сенин Петр Васильевич – *главный редактор*, доктор технических наук, профессор, руководитель Высшей школы развития научно-образовательного потенциала Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru (Саранск, Российская Федерация)

Левцев Алексей Павлович – *заместитель главного редактора*, технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетических систем Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2429-6777>, levtzevap@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Чаткин Михаил Николаевич – *заместитель главного редактора*, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru (Саранск, Российская Федерация)

Гордина Екатерина Павловна – *ответственный секретарь* редакции научных журналов Национального исследовательского Мордовского государственного университета, vestnik_mrsu@mail.ru (Саранск, Российская Федерация)

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы – доктор биологических наук, академик Российской Академии Естествознания, профессор кафедры экологии и природопользования Московского педагогического государственного университета (Москва, Российская Федерация); профессор кафедры лесной индустрии Бартынского государственного университета (Бартын, Турция)

Астахов Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики Калужского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-1611> (Калуга, Российская Федерация)

Булгаков Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства Юго-Западного государственного университета (Курск, Российская Федерация); профессор строительного факультета Дрезденского технического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4261-9840> (Дрезден, Германия)

Гербер Юрий Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833> (Симферополь, Российская Федерация)

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

Димитров Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством Донского государственного технического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1439-1674> (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Жачкин Сергей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011> (Воронеж, Российская Федерация)

Железникова Ольга Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, директор Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (Саранск, Российская Федерация)

Игумнов Леонид Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ТКЭМ ИИТММ Национального исследовательского Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0119> (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Истомина Наталья Леонидовна – доктор физико-математических наук, начальник отдела физических наук Российской академии наук, заместитель академика-секретаря по научно-организационной работе ОФН РАН; профессор кафедры управления инновациями Московского авиационного института (национального исследовательского университета); главный редактор научно-технического журнала «Фотоника», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6008-1226> (Москва, Российская Федерация)

Кечемайкин Владимир Николаевич – кандидат экономических наук, доцент, директор Рузаевского института машиностроения Национального исследовательского Мордовского государственного университета, (Саранск, Российская Федерация)

Котин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8235-0052> (Саранск, Российская Федерация)

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

Кухарев Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор, ректор Пензенского государственного аграрного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3519-4066> (Пенза, Российская Федерация)

Лобачевский Яков Петрович – доктор технических наук, профессор, академик РАН, первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962> (Москва, Российская Федерация)

Микаева Светлана Анатольевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники МИРЭА – Российского технологического университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X> (Москва, Российская Федерация)

Несмиян Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и средств механизации агропромышленного комплекса, заместитель директора по научной работе и инновациям Азово-Черноморского инженерного института Донского государственного аграрного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-8081> (Зерноград, Российская Федерация)

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского научно-исследовательского института использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X> (Тамбов, Российская Федерация)

Плотников Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591> (Киров, Российская Федерация)

Прытков Юрий Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры зоотехники имени профессора С. А. Лапшина Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4344-4383> (Саранск, Российская Федерация)

Рудик Феликс Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий продуктов питания Саратовского государственного аграрного университета имени Н. И. Вавилова, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115> (Саратов, Российская Федерация)

Рябочкина Полина Анатольевна – доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель лаборатории оптической спектроскопии лазерных материалов Национального исследовательского Мордовского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-8486> (Саранск, Российская Федерация)

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

Симдянкин Аркадий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры биомеханики и естественно научных дисциплин Российского университета спорта «ГЦОЛИФК», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9761-6183> (Москва, Российская Федерация)

Скрябин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и оборудования машиностроения Пензенского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198> (Пенза, Российская Федерация)

Тарасов Евгений Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343> (Самара, Российская Федерация)

Федулова Лилия Вячеславовна – доктор технических наук, профессор РАН, заведующий экспериментальной клиникой лаборатории биологически активных веществ животного происхождения Федерального научного центра пищевых систем имени В. М. Горбатова РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-930X> (Москва, Российская Федерация)

Шишелова Тамара Ильинична – доктор технических наук, профессор кафедры физики Иркутского национального исследовательского технического университета, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7533-2401> (Иркутск, Российская Федерация)

EDITORIAL BOARD

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

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

Mikhail N. Chatkin – *Deputy Editor-in-Chief*, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of the Department of Mobile Energy Facilities and Agricultural Machines named after Professor A.I. Leshchankin, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru (Saransk, Russian Federation)

Ekaterina P. Gordina – *Executive Editor*, National Research Mordovia State University, vestnik_mrsu@mail.ru (Saransk, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



- Alexander V. Kotin** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanization of Agricultural Production Processing, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8235-0052> (Saransk, Russian Federation)
- Oleg N. Kukharev** – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Rector of Penza State Agrarian University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3519-4066> (Penza, Russian Federation)
- Fedor V. Kusmartsev** – Ph.D., Head of the Physics Department, Loughborough University (Loughborough, Great Britain); Professor of the College of Arts and Sciences, Khalifa University (Abu Dhabi, UAE)
- Yakov P. Lobachevskiy** – Dr.Sci. (Engr.), Professor, First Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of RAS, Academician of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962> (Moscow, Russian Federation)
- Svetlana A. Mikayeva** – Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electronics, MIREA – Russian Technological University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X> (Moscow, Russian Federation)
- Andrey Yu. Nesmiyan** – Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, Deputy Director for Research and Innovation, Azov-Black Sea Engineering Institute of Don State Agrarian University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767> (Zernograd, Russian Federation)
- Valeriy V. Ostrikov** – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Director of the All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2927-768X> (Tambov, Russian Federation)
- Sergey A. Plotnikov** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591> (Kirov, Russian Federation)
- Yuriy N. Prytkov** – Dr.Sci. (Agric.), Professor of the Prof. S. A. Lapshin Chair of Zootechnics, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)
- Feliks Ya. Rudik** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115> (Saratov, Russian Federation)
- Polina A. Ryabochkina** – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Scientific Officer of the Laboratory of Optical Spectroscopy of Laser Materials, National Research Mordovia State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-8486> (Saransk, Russian Federation)
- Abdel-Badeeh M. Salem** – Dr.Sci. (CS), Professor Emeritus, Head of Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Research Labs, Professor of the Faculty of Computer and Information Sciences, Ain Shams University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0268-6539> (Cairo, Egypt)
- Tamara I. Shishelova** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Physics, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)
- Arkadii A. Simdiankin** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technical Biomechanics and Natural Science Subjects, the Russian University of Sport (GTSOLIFK), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9761-6183> (Moscow, Russian Federation)
- Vladimir A. Skryabin** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technology and Equipment in Mechanical Engineering, Penza State University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-9198> (Penza, Russian Federation)
- Evgeniy M. Tarasov** – Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Automatics, Telemechanics and Communication on Railway Transport, Samara State Transport University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2717-7343> (Samara, Russian Federation)
- Sergey Yu. Zhachkin** – Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Operation of Transport and Technological Machines, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011> (Voronezh, Russian Federation)
- Olga Ye. Zheleznikova** – Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Director of the Institute of Electronics and Light Engineering, National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Соловьёв С. В., Черников В. Г., Ростовцев Р. А., Романенко В. Ю. Результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана	350
Савин В. Ю., Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Отделение легких примесей из очесанного вороха в корпусе адаптера	370
Несмиян А. Ю., Дубина К. П., Бутенко А. Ф., Жигайлова А. П., Войнаш С. А., Ореховская А. А. Исследование процесса подачи семян пропашных культур вакуумным аппаратом точного высева	388
Джаббаров Н. И., Мишанов А. П., Добринов А. В., Савельев А. П. Моделирование и оценка уровня плодородия почвы	407

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование характеристик впрыскивания и распыливания метанолсодержащего топлива в дизельном двигателе	424
Иванов Е. Г., Воротников И. Л., Пасин А. В., Седов А. В., Ошурков М. В. Структура течений и периодические процессы в дискообразной вихревой камере гидродинамического кавитатора	444

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Столяров В. В. Критические параметры атермического электропластического эффекта в металлических материалах	461
Пенджиев А. М., Оразов П. О. Теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда»	474

ОПТИКА

Гладких В. А., Власенко В. Д. Влияние микроизгиба на поле и энергию слабораправляющего оптоволокна с градиентным профилем в одномодовом режиме	495
Информация для авторов и читателей	516



CONTENTS

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Solovyov S. V., Chernikov V. G., Rostovtsev R. A., Romanenko V. Yu. The Results of Laboratory Study on the Separating Fiber Flax Seed Balls when Combing the Standing Plants with a Single-Rotor Comb-Dresser	350
Savin V. Yu., Ozherelev V. N., Nikitin V. V. Separating Light Impurities from the Combed Heap in the Adapter Case	370
Nesmiyan A. Yu., Dubina K. P., Butenko A. F., Zhigailova A. P., Voinash S. A., Orekhovskaya A. A. The Study of the Process of Supplying Seeds of Row Crops Using a Vacuum Seed-Placing Unit	388
Jabborov N. I., Mishanov A. P., Dobrinov A. V., Savelyev A. P. Modeling and Assessment of Soil Fertility Level	407

AGRICULTURAL ENGINEERING

Likhanov V. A., Lopatin O. P. Investigating the Characteristics of Injecting and Spraying Methanol-Containing Fuel in a Diesel Engine	424
Ivanov E. G., Vorotnikov I. L., Pasin A. V., Sedov A. V., Oshurkov M. V. Flow Structure and Periodic Processes in a Disc-Shaped Vortex Chamber of a Hydrodynamic Cavitator	444

INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

Stolyarov V. V. Critical Parameters of the Athermal Electroplastic Effect in Metallic Materials	461
Penjiyev A. M., Orazov P. O. Thermal Energy Resource Potentials of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “Solar Pond”	474

OPTICS

Gladkikh V. A., Vlasenko V. D. Micro-Bending Effect on the Field and Energy of Weakly Guiding Optical Fiber with a Gradient Profile in Single-Mode Regime	495
---	-----

Information for Authors and Readers of the Journal	516
---	-----

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Оригинальная статья / Original article

УДК 631.358:633.526.41

doi: [10.15507/2658-4123.034.202403.350-369](https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.350-369)

Результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана

С. В. Соловьёв[✉], В. Г. Черников,
Р. А. Ростовцев, В. Ю. Романенко
ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»
(г. Тверь, Российская Федерация)

[✉] s.solovyov@fnclk.ru

Аннотация

Введение. Низкая чистота очеса семенных коробочек растений льноуборочными машинами является проблемой в технологической операции при уборке льна-долгунца. Анализ конструкций гребенок очесывающих устройств позволил выявить основные недостатки, не позволяющие в полном объеме обеспечить агротехнические требования при уборке льна-долгунца, поэтому предложена инновационная конструкция съемной гребенки для однороторных жаток барабанного типа.

Цель исследования. Определить чистоту очеса стеблей льна-долгунца при очесе на корню съемными очесывающими гребенками однороторного очесывающего барабана.

Материалы и методы. Изготовлена экспериментальная установка, которая позволяет смоделировать процесс очеса льна на корню гребенками однороторного очесывающего барабана. За период с 2018 по 2023 год были исследованы и обоснованы конструктивные параметры и режимы работы очесывающего устройства. Разработана методика проведения многофакторного эксперимента по определению чистоты очеса льна-долгунца очесывающим устройством барабанного типа с размещенными на нем съемными гребенками.

Результаты исследования. Представлены результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек от стеблей льна-долгунца на корню съемными очесывающими гребенками с целью определения качества очеса. Установлено, что чистота очеса растений льна-долгунца на корню составляет до 99,2 %.

Обсуждение и заключение. При очесе растений льна-долгунца сорта Надежда на корню съемными гребенками однороторного барабана в лабораторных условиях были изучены физико-механические свойства стеблей, определены оптимальные режимы работы очесывающего барабана, которые обеспечивают чистоту очеса стеблей выше 98 %, что соответствует агротехническим требованиям, предъявляемым к льнокомбайнам.

© Соловьёв С. В., Черников В. Г., Ростовцев Р. А., Романенко В. Ю., 2024



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



Ключевые слова: съемная очесывающая гребенка, лен-долгунец, чистота очеса, установочный зазор, очесывающий барабан

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и предложения, сделанные при рецензировании статьи.

Для цитирования: Результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана / С. В. Соловьёв [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 350–369. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.350-369>

The Results of the Laboratory Study on the Separating Fiber Flax Seed Balls when Combing the Standing Plants with a Single-Rotor Comb-Dresser

S. V. Solovyov[✉], V. G. Chernikov,
R. A. Rostovtsev, V. Yu. Romanenko
Federal Research Center for Bast Fiber Crops (CBFC)
(Tver, Russian Federation)

[✉] s.solovyov@fncl.ru

Abstract

Introduction. The low purity of combing flax seed balls with flax harvesters is a problem for the technological operation when harvesting fibre flax. The analysis of the comb designs of the combing units made it possible to identify the main disadvantages that do not fully meet the agrotechnical requirements for harvesting fiber flax. An innovative design of a removable comb for single-rotor drum-type harvesters is proposed.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the purity of combing the standing fiber flax stems using a single-rotor comb-dresser with removable combs.

Materials and Methods. There has been made an experimental setup to simulate the process of combing standing fiber flax plants with combs of a single-rotor comb dresser. During the period from 2018–2023, the design parameters and operating modes of the combing unit were investigated and justified. There has been developed a technique for conducting a multifactorial experiment to determine the purity of combing fiber flax using a combing drum-type unit with removable combs.

Results. The results of laboratory studies on the separating flax balls from the standing fiber flax stems by removable combs are presented to determine the combing quality. It has been found that the purity of combing fiber flax plants is up to 99.2%.

Discussion and Conclusion. When studying the technological process of combing Nadezhda standing fiber flax plants the with single-rotor drum removable combs, the physico-mechanical properties of the flax stems were studied in laboratory conditions, the optimal operating modes of the combing drum were determined, which ensure the purity of the stems above 98% that meets the agrotechnical requirements for flax combines.

Keywords: removable combing comb, flax, combing purity, installation gap, combing drum

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal State Budgetary Educational Institution FNC LC (No. FGSS-2022-0005).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for the valuable comments and suggestions made during the review of the article.

For citation: Solovyov S.V., Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. The Results of the Laboratory Study on the Separating Fiber Flax Seed Balls when Combining the Standing Plants with a Single-Rotor Comb-Dresser. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):350–369. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.350-369>

Введение. Наиболее трудоемким и затратным процессом в льноводстве является уборка, на долю которой, в зависимости от принятой технологии, приходится 65–80 % затрат труда, 55–75 % денежных затрат и до 40 % затрат энергии.

Одной из основных технологических операций при уборке льна-долгунца является отделение семенной части – коробочек от стеблей. Очес влияет на показатели потери семян и соломы, выход и качество волокна, состав вороха, трудоемкость и энергоемкость процессов его сушки и переработки.

Процесс очеса растений льна-долгунца заключается в отделении семенных коробочек от стеблей, при этом механические воздействия очесывающих рабочих органов на слой стеблей приводят к деформации семенных коробочек с их частичным или полным разрушением.

До начала 2000-х гг. в России и Белоруссии лен-долгунец преимущественно убирался при помощи льноуборочных комбайнов. Данная технология имела ряд недостатков. Анализируя многолетние испытания льнокомбайна ЛК-4 на машиностроительных станциях, определили, что общие невозвратимые потери семян составляют в среднем 6,63 %, что выше допускаемых по агротехническим требованиям норм. Небольшая ширина захвата (1,52 м) и рабочая скорость (до 7 км/ч) снижают производительность агрегата до 1 га/ч. По современным меркам это не допустимо, так как приходится увеличивать сроки уборки, количество задействованной техники и человеческого ресурса. Кроме этого, на выходе мы получаем льноворох с семенами, который нуждается в дальнейшей переработке.

Технология уборки льна-долгунца методом очеса на корню имеет ряд достоинств перед уборкой льнокомбайном. Использование серийных зерноуборочных комбайнов дает большой экономический эффект за счет ухода от узконаправленной льноуборочной техники и позволяет получить первично очищенные семена. Применение серийных очесывающих жаток с шириной захвата от 4 до 8 м обеспечивает высокую производительность и позволяет значительно сократить сроки уборки, что очень актуально при плохих погодных условиях.

В этой связи задача по обоснованию и разработке малозатратной и эффективной технологии уборки льна путем очеса растений на корню серийными жатками, которые агрегируются с зерноуборочным комбайном, является актуальной.

Агротехнические требования к процессу очеса на корню идентичны требованиям, предъявляемым к льноуборочным комбайнам: семенной материал (ворох)

должен быть отделен от растений с чистотой не менее 98 % и содержанием путанины не более 3 % [1], после воздействия рабочих органов льноуборочной техники стебли должны сохранять свою целостность и природную прочность [2].

Цель исследования заключается в определении чистоты очеса стеблей льна-долгунца при очесе на корню съемными очесывающими гребенками однороторного очесывающего барабана.

Обзор литературы. Инновационный способ уборки льна-долгунца разработан ФГБНУ ФНЦ совместно с ПАО «Пензмаш»¹. Новизна технических решений подтверждена патентом на изобретение № 2693728 [3].

Данный способ позволяет осуществлять первичную очистку семян непосредственно в процессе уборки льна, а также производить формирование ленты из очесанных стеблей поперечным транспортером и ее расстил на льнище. Производственные испытания данного способа показали, что очес растений не в полной мере удовлетворяет агротехнические требования, предъявляемые к льнокомбайнам. Это обусловлено применением серийных очесывающих гребенок. Многофункциональный агрегат, состоящий из зерноуборочного комбайна, оснащенного очесывающей жаткой с теребильным аппаратом, представлен на рисунке 1.



Р и с. 1. Общий вид многофункционального агрегата

F i g. 1. General view of the multifunctional unit

Источник: фотография сделана автором при полевых испытаниях инновационного способа уборки льна-долгунца на полях «Шексна», Шекснинского района, Вологодской области в 2019 г.

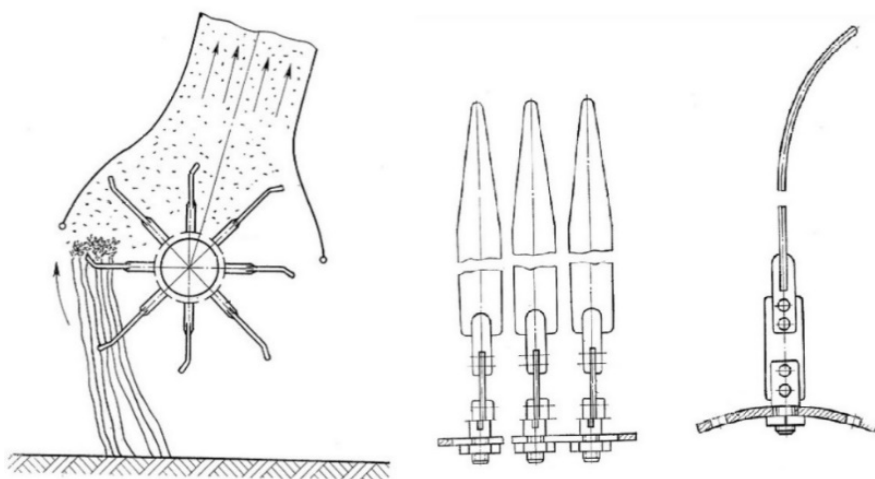
Source: the photo is taken by the author during field testing of an innovative method of harvesting fiber flax in the fields of “Sheksna”, Sheksninsky district, Vologda region in 2019.

¹ Очесывающая жатка «Озон» [Электронный ресурс]. URL: <https://penzmash.ru/root/tehnicheskie-harakteristiki-zhatki-ozon>. (дата обращения: 25.01.2024).

Анализ конструкций очесывающих гребенок позволил выявить основные недостатки, которые влияют на чистоту очеса и не обеспечивают агротехнические требования при уборке льна-долгунца [4–6].

Известен рабочий орган для очесывания верхушек растений [7] (рис. 2). Он содержит барабан, на котором жестко закреплены кронштейны, соединенные с очесывающими пальцами пластинами посредством болтового или заклепочного соединения [8]. Очесывающие пальцы представляют собой пластины с изогнутым профилем.

Основным недостатком данного устройства при уборке лубяных культур льна-долгунца является низкая чистота очеса семенных коробочек, образование намоток на места крепления очесывающих пальцев, а также потери в местах крепления очесывающих пальцев с барабаном [8].



Р и с. 2. Рабочий орган для очеса верхушек растений

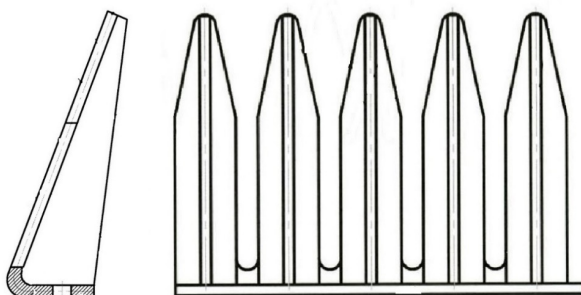
F i g. 2. Working body for combing the tops of plants

Источник: составлено по [8].

Source: is compiled from [8].

Известна гребенка (рис. 3). Она имеет вид пластины с изогнутым профилем, основание которой служит для крепления гребенки с очесывающим барабаном посредством болтового соединения, а отогнутая часть является рабочей поверхностью, которая имеет прорезь для очеса семенной части растений. Для жесткости гребенки установлены ребра [9].

Основной недостаток данной гребенки заключается в том, что прорези не обеспечивают свободный выход растений из них, в результате чего происходит заклинивание и отрыв верхней части. Это приводит к дополнительным энергозатратам процесса очеса, намоткам стеблей на очесывающий барабан и значительный отход стеблей в путанину [10]. Рабочий зазор гребенки выполнен по всей длине боковины, поэтому при транспортировке семян происходят потери.



Р и с. 3. Гребенка

F i g. 3. The comb

Источник: составлено по [10].

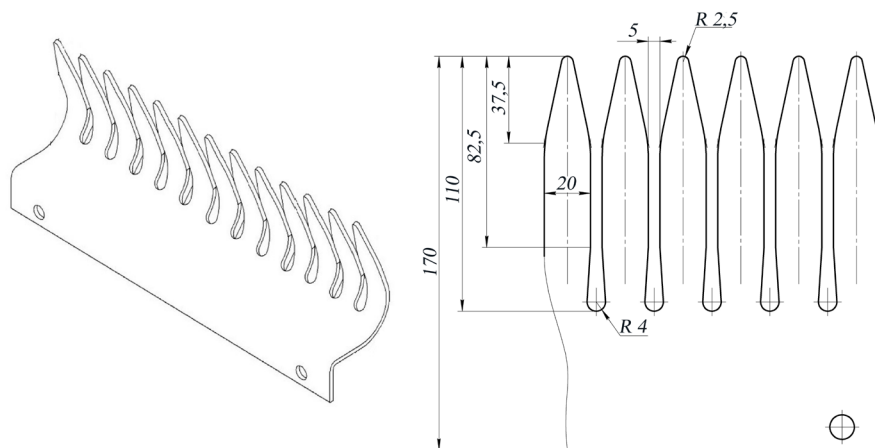
Source: is compiled from [10].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что применяемые вышеописанные гребенки не в полной мере удовлетворяют агротехническим требованиям и не позволяют полностью обеспечить чистоту очеса льна-долгунца. Это обуславливает необходимость определения оптимальных конструктивных размеров и режимов работы очесывающего аппарата многофункционального агрегата для очеса растений льна на корню, для чего нами и было проведено настоящее исследование.

Материалы и методы. Лабораторные исследования проводились согласно методам и испытаниям комбайнов и льнокомбайнов, ГОСТ 33734-2016 [11].

Для решения поставленной задачи на базе ФГБНУ ФНЦ ЛК в период с 2018 по 2023 г. проводились теоретические исследования процесса очеса льна-долгунца на корню очесывающим устройством барабанного типа [2]. На их основании определены основные конструктивные параметры рабочего органа съемной очесывающей гребенки: ширина установочного зазора – 5 мм; оптимальная длина зуба очесывающей гребенки – 110 мм [12]. Также определены технологические режимы: скорость движения агрегата – 5 км/ч, при частоте вращения очесывающего барабана $6,16 \text{ с}^{-1}$. Определена зависимость установки очесывающего барабана от расположения семенных коробочек растений льна-долгунца.

На основании проведенных научных изысканий предложена конструкция съемной гребенки для однороторных жаток барабанного типа [13]. Съемная очесывающая гребенка представляет собой изогнутую под углом 90° пластину, основание которой служит для крепления гребенки к очесывающему барабану. Отогнутая поверхность имеет прорезы и зубья, при этом прорезы выполнены на расстоянии $\frac{3}{4}$ от вершины зубьев до линии изгиба пластины. Зубья имеют заострение сверху для входа в растительную массу и формирования слоя, далее переходят в прямой профиль, на котором происходит процесс очеса, и плавное расширение у основания, которое позволяет устранить заклинивание растений между зубьями и обеспечивает уменьшение энергозатрат процесса очеса [2]. В то же время прорезь выполнена не по всей длине боковины гребенки, что позволяет транспортировать семена без потерь. Съемная очесывающая гребенка изображена на рисунке 4.



Р и с. 4. Съемная гребенка для однороторной очесывающей жатки барабанного типа
F i g. 4. Removable comb for single-rotor drum-type combing harvester

Источник: схема составлена автором статьи в программе Компас-3D v17.

Source: the diagram was compiled by the author of the article with the use of Compass-3D v17 program.

На базе ФГБНУ ФНЦ ЛК изготовлена лабораторная установка, которая позволяет произвести камеральные исследования по определению качества чистоты очеса растений льна-долгунца на корню съемными гребенками, установленными на очесывающей жатке барабанного типа. Лабораторная установка представлена на рисунке 5, технические характеристики представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Технические характеристики лабораторной установки
Technical characteristics of the laboratory installation

№ п/п	Характеристика / Characteristic	Значение / Meaning
1	Диаметр очесывающего барабана по очесывающим гребенкам D, м / The diameter of the combing drum according to the combing combs D, m.	0,75
2	Количество рядов гребенок на барабане z, шт. / The number of rows of combs on the drum z, pcs.	8
3	Частота вращения очесывающего барабана n, с ⁻¹ / The rotation speed of the combing drum n, c ⁻¹	0–10
4	Линейная скорость зажимных-транспортирующих ремней V, м/с / Linear speed of the clamping and transporting belts V, m/s	0–2,5
5	Количество рядов растений, шт. / Number of rows of plants, pcs	1
6	Диапазон регулировки высоты установки растений льна-долгунца, м / The range of adjustment of the height of the installation of flax plants, m.	0–0,9



Р и с. 5. Общий вид лабораторной установки:

- 1 – энергетическая установка для привода транспортера с регулировкой скорости движения ремней зажимного транспортера через коробку переменных передач (КПП);
 2 – привод очесывающего устройства, включающий электродвигатель 1,1 кВт, 25 с⁻¹ и ременную передачу (передаточное отношение 1:2,5); 3 – карданная передача; 4 – транспортер зажимной (зажимные ремни); 5 – очесывающий барабан, смонтированный на раме с обтекателем;
 6 – приемная камера для сбора вороха; 7 – пульт управления с частотным преобразователем для регулировки частоты вращения очесывающего барабана; 8 – съемная очесывающая гребенка

Fig. 5. General view of the laboratory installation:

- 1 – power plant for driving a conveyor with speed control of the belts of the clamping conveyor through a variable transmission (gearbox); 2 – drive of the combing device, including an electric motor of 1.1 kW, 1 500 rpm and a belt drive (gear ratio 1:2.5); 3 – gimbal transmission; 4 – clamping conveyor (clamping belts); 5 – a combing drum mounted on a frame with a fairing; 6 – a receiving chamber for collecting piles; 7 – a control panel with a frequency converter to adjust the rotation frequency of the combing drum; 8 – a removable combing comb

Источник: фотографии для рисунков 5–10 сделаны автором при проведении камеральных исследований в научно-производственной лаборатории ФНЦ ЛК города Тверь в 2023 г.

Source: the photos 5–10 are taken by the author while conducting desk research in the research and manufacturing laboratory of the Federal Scientific Center for studying Fiber Corn in the city of Tver in 2023.

Установка имеет схожие технические характеристики с жаткой «Озон» производства ПАО «Пензмаш»² (таблица 2).

Т а б л и ц а 2
Table 2

Технические характеристики жатки «Озон»
Technical characteristics of the header «Ozone»

№ п/п	Характеристика / Characteristic	Значение / Meaning
1	Диаметр очесывающего барабана по очесывающим гребенкам D, м / The diameter of the combing drum according to the combing combs D, m.	0,70
2	Количество рядов гребенок на барабане z, шт. / The number of rows of combs on the drum z, pcs.	10
3	Частота вращения очесывающего барабана n, с ⁻¹ / The rotation speed of the combing drum n, c ⁻¹	6,25–8,83
4	Ширина захвата, м / The width of the capture, m	4–10
5	Ширина установочного зазора между зубьями, мм / Width of installation gap between teeth, mm	7,5–8,0

Стебли льна долгунца устанавливали в зажимных ремнях транспортера 4 (рис. 5), который изготовлен из картера льнокомбайна ЛК-4 с удлиненными теребивильными секциями, привод осуществляется от энергетической установки 1 через карданную передачу 3.



Р и с. 6. Установка стеблей льна-долгунца для проведения эксперимента
F i g. 6. Installation of flax stems for conducting an experiment

² Очесывающая жатка «Озон» [Электронный ресурс]. URL: <https://penzmash.ru/root/tehnicheskie-harakteristiki-zhatki-ozon>. (дата обращения: 25.01.2024).

Регулировка линейной скорости транспортера осуществлялась через КПП, смонтированную совместно с энергетической установкой, диапазон скоростей от 0 до 2,5 м/с.

При проведении лабораторных работ растительная масса льна-долгунца, зажатая в зажимных ремнях, подавалась к очесывающему устройству 5, имеющему несущую раму, с установленным на нем очесывающим барабаном и закрепленными съемными гребенками 8 (рис. 5).

Привод очесывающего барабана осуществляется от электродвигателя 2 через ременную передачу. Диапазон регулировки частоты вращения очесывающего барабана от 0 до 10 с⁻¹ регулируется с пульта управления 7 частотным преобразователем ВЕСПЕР Е2-8300 (рис. 5) [2]. Замер частоты вращения очесывающего барабана производился цифровым универсальным тахометром марки МЕГЕОН-1800Х, показания снимались механическим путем с оси вращения барабана. Влажность материала для опытов была определена влагомером ИВЛТ-1, разработанным ФНЦ ЛК для оценки влажности тресты (рис. 7) [14]. Технические характеристики влагомера представлены в таблице 3. Влажность материала составила 43 %.



Р и с. 7. Измерение влажности стеблей

F i g. 7. Measuring the moisture content of stems

Отбор материала для проведения исследования проводился путем применения типичных, общепринятых методик с использованием приборов и оборудования в соответствии с ГОСТ. Растения собирались вручную с опытных делянок обособленного подразделения ОП НИИЛ г. Торжок, после чего материал связывали в снопы и доставляли в научно-производственную лабораторию ФНЦ ЛК.

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Технические характеристики влагомера ИВЛТ-1
Technical characteristics of the IVLT-1 moisture meter

Наименование параметра / Name of the parameter	Значение / Meaning	
Диапазон измерения влажности льняной тресты (W – весовая влажность) / The humidity measurement range of linen trusts (W is the weight humidity)	1–55 %	
Пределы допускаемой погрешности измерения влажности / Limits of permissible error of humidity measurement	±2 % (в диапазоне влажности от 5 до 35 %) / (in the humidity range from 5 to 35%)	
Длительность периода одного измерения / The duration of the period of one measurement	1 с / s	
Габаритные размеры влагомера, мм: / Overall dimensions of the moisture meter, mm:	длина / length	180
	ширина / width	320
	высота / height	600
Масса влагомера, г / Moisture meter weight, g	850	

Подготовка навесок осуществлялась следующим образом: в 2023 году исследовали биологическую урожайность льна-долгунца (табл. 4) на опытных делянках, после чего определили средний вес одного растения, который составил 0,5 г. Взвешивание производилось на электронных весах ВЛТЭ-1100Т, класс точности по ГОСТ 24104-88. Вес одной навески для опытов 300 г (рис. 8).

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Характеристики исходного материала льна-долгунца
Characteristics of the source material of long-lived flax

№ п/п	Характеристика / Characteristic	Значение / Meaning
1	Сорт льна-долгунца / A variety of long-lived flax	Надежда / Hope
2	Фаза спелости льна-долгунца / The ripeness phase of flax	Ранняя желтая / Early Yellow
3	Влажность стеблей, % / Humidity of the stems, %	43
4	Густота стеблестоя, шт./м ² / Stem density, pcs/m ²	1 750
5	Урожайность льносоломы, т/га / Yield of flax straw, t/ha	3,2–3,6
6	Урожайность семян, т/га / Seed yield, t/ha	0,50–0,65

Перед установкой в зажимные ремни растения распределялись на участке длиной 1 м, выравнивалась верхушечная часть, после чего растения заводили в зажимные ремни, тем самым образуя рядок растений. В момент закрепления растений в зажимные ремни устанавливали необходимую высоту. Высоту установки растений регулировали измерительной линейкой ГОСТ 427-75.

Лен-долгунец, взаимодействуя с обтекателем очесывающего устройства 5 (рис. 5), отклонялся и попадал к очесывающим гребенкам 8. Съемные очесывающие гребенки, перемещаясь вместе с барабаном снизу вверх, захватывали верхушечную часть стеблей льна-долгунца, на которых расположены семенные коробочки, и поступали в установочный зазор между зубьями гребенки. После взаимодействия зубьев гребенки со стеблями образовывался семенной ворох, который состоял из семенных коробочек, свободных семян и путанины. Эта масса попадала в приемную камеру 6 для сбора вороха [2].



Р и с. 8. Навески для проведения эксперимента

F i g. 8. Attachments for the experiment

После проведения опыта очесанный ворох собирался в тару и нумеровался. Ворох разделяли на семенные коробочки, включающие свободные семена от стеблей, и производили взвешивание на электронных весах марки ВЛТЭ-1100Т. Производили подсчет неочесанных семенных коробочек со стеблей для определения чистоты очеса растений льна-долгунца (рис. 9).



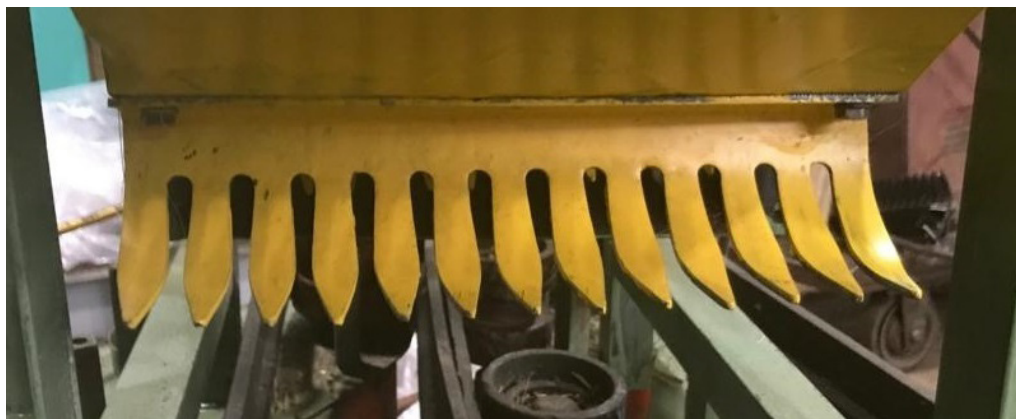
Р и с. 9. Материал после проведения опытов

F i g. 9. The material after the experiments

Выбор факторов влияния и интервалов их варьирования проводили при помощи метода планирования эксперимента [15]. В качестве критерия оптимизации работы очесывающего аппарата на основании проведенных теоретических исследований была выбрана чистота очеса растений [16].

По проведенным ранее исследованиям были выявлены наиболее существенные факторы, влияющие на качество очеса [17]. К ним относятся: x_1 – ширина установочного зазора гребенки (t , м); x_2 – расстояние от поверхности почвы до очесывающей гребенки при захвате растений (h_e , м); x_3 – частота вращения очесывающего барабана (n_o , с⁻¹).

На рисунке 10 представлена съемная очесывающая гребенка для проведения эксперимента. В условиях научно-производственной лаборатории ФНЦ ЛК было изготовлено три комплекта гребенок с различной шириной установочного зазора (3, 5 и 7 мм).



Р и с. 10. Съемная гребенка очесывающего барабана

F i g. 10. Removable comb of the comb-dresser

Корреляционная зависимость была представлена в виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2,$$

где y – критерий оптимизации (отклик); b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии; i, j – номера факторов.

Используем линейную часть корреляционной зависимости:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3,$$

а при ее адекватности – квадратичную:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Для реализации уравнения был принят некомпозиционный план второго порядка Бокса-Бенкина [18]. Матрица планирования некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов представлена в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

Table 5

Матрица плана эксперимента
The matrix of the experiment plan

Обозначение / The designation	Факторы / The factor		
	Ширина установочного зазора t_0 , мм / The width of the installation gap t_0 , mm	Расстояние от поверхности почвы до очесывающей гребенки при захвате растений h , м / The distance from the soil surface to the combing comb when capturing plants h , m	Частота вращения барабана n_0 , с ⁻¹ / The rotation speed of the drum rotor n_0 , с ⁻¹
1	7	0,50	6,16
2	3	0,40	6,16
3	7	0,40	6,16
4	3	0,50	6,16
5	7	0,45	7,83
6	3	0,45	4,50
7	7	0,45	4,50
8	3	0,45	7,83
9	5	0,50	7,83
10	5	0,40	4,50
11	5	0,50	4,50
12	5	0,40	7,83
13	5	0,45	6,16
14	5	0,45	6,16
15	5	0,45	6,16

После обработки данных многофакторного эксперимента программным пакетом Statgraphics 18 были получены значения функций отклика. Уравнение с учетом значимости коэффициентов имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y = & -101,062 + 14,5525 \cdot x_1 + 0,64278 \cdot x_2 + 0,0765961 \cdot x_3 - \\
 & -1,2198 \cdot x_1^2 - 0,00674083 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,00870833 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0067095 \cdot x_2^2 + \\
 & + 0,0000147 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0000968292 \cdot x_3^2.
 \end{aligned}$$

Результаты многофакторного эксперимента отражены в таблице 6.

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6Результаты многофакторного эксперимента
The results of a multifactorial experiment

Фактор / The factor	Сумма квадратов факторов / The sum of the squares of the factors	Средний квадрат факторов / The average square of the factors	F-Ratio	P-Value
x_1	12,216500	12,216500	7,51	0,0104
x_2	6,827730	6,827730	4,20	0,0497
x_3	60,763500	60,763500	37,34	0,0000
$x_1 \cdot x_1$	163,246000	163,246000	100,33	0,0000
$x_1 \cdot x_2$	5,452660	5,452660	3,35	0,0775
$x_1 \cdot x_3$	0,364008	0,364008	0,22	0,6398
$x_2 \cdot x_2$	19,293200	19,293200	11,86	0,0018
$x_2 \cdot x_3$	0,064827	0,064827	0,04	0,8432
$x_3 \cdot x_3$	6,429180	6,429180	3,95	0,0564

Вариабельность чистоты очеса на отдельные части для каждого из факторов. Затем они были проверены на статистическую значимость каждого фактора путем сравнения среднеквадратичного значения с оценкой экспериментальной ошибки. В результате пять факторов имеют Р-значения менее 0,05, что указывает на значительное их отличие от нуля при уровне достоверности 95,0 % и влияние их на чистоту очеса.

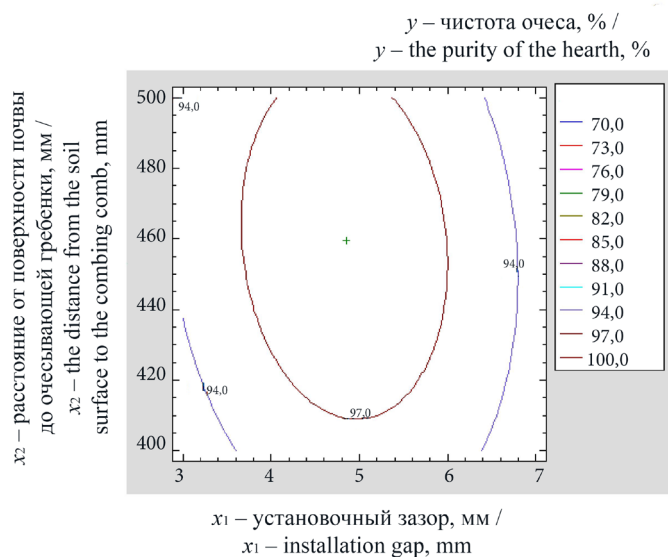
Получены оптимальные значения факторов, при которых возможно достичь чистоту очеса растений льна-долгунца на уровне 99,2 %. Оптимальные значения факторов приведены в таблице 7.

Т а б л и ц а 7
T a b l e 7Оптимальные значения факторов
Optimal values of the factors

Фактор / The factor	Нижний уровень / Lower level	Верхний уровень / Upper level	Точка оптимума / The optimum point
x_1	3,00	7,00	4,85
x_2	400,00	500,00	459,56
x_3	4,50	7,83	6,03

Максимальная чистота очеса достигается при установочном зазоре очесывающих гребенок 4,8 мм, расстоянии от поля до очесывающей гребенки 0,46 м и частоте вращения очесывающего барабана 6,03 с⁻¹.

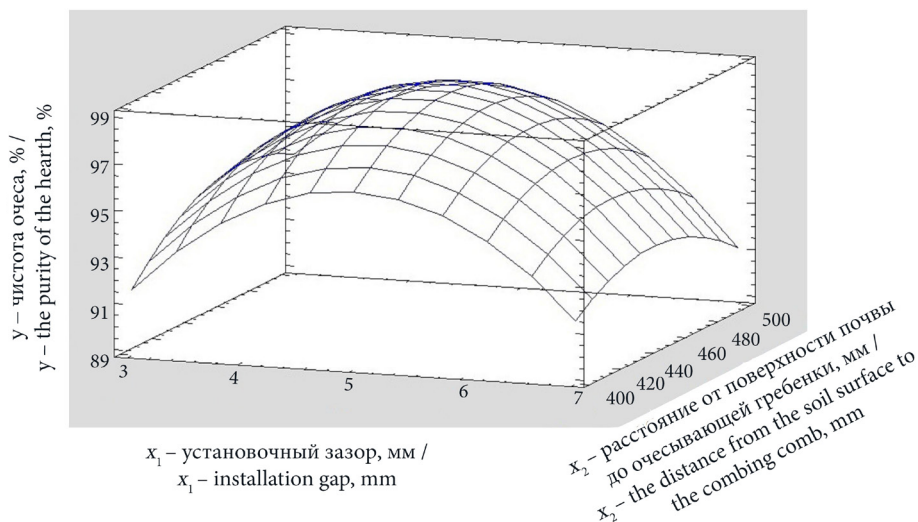
Контуры области и поверхность предполагаемого отклика при частоте вращения барабана 6,16 с⁻¹ представлены на рисунках 11, 12.



Р и с. 11. Область точки оптимума
F i g. 11. The area of the optimum point

Источник: графики для рисунков 11, 12 построены с помощью программного пакета Statgraphics 18.

Source: the graph is created using the Statgraphics 18 software package.



Р и с. 12. Поверхность точки оптимума
F i g. 12. The surface of the optimum point

Обсуждение и заключение. Разработана методика проведения многофакторного эксперимента по определению чистоты очеса. Опытным путем подтверждены теоретические исследования конструкции и режима работы очесывающего барабана.

Результатом камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана стали выводы о том, что максимальная чистота очеса растений 99,2 % достигается при установочном зазоре очесывающих гребенок 4,85 мм, расстоянии от почвы до очесывающей гребенки 0,46 м и частоте вращения очесывающего барабана 6,03 с⁻¹. Полученные данные могут быть применены для изготовления гребенок серийных очесывающих однороторных жаток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пути повышения надежности льноуборочных машин / В. Г. Черников [и др.] // Техника и оборудование для села. 2017. № 2. С. 30–33. EDN: XXRSML
2. Черников В. Г., Ростовцев Р. А., Соловьёв С. В. Исследование параметров и режимов работы аппарата для очеса льна на корню // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 2. С. 13–18. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-13-18>
3. Способ уборки льна и многофункциональный агрегат для его осуществления : патент 2693728 Российская Федерация / Игнатов В. Д. [и др.]. № 2018129503 ; заявл. 13.08.2018 ; опубл. 04.07.2019. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2693728C1_20190704.pdf (дата обращения: 25.01.2024).
4. Алдошин Н. В., Мосяков М. А. Совершенствование конструкции очесывающих устройств для уборки зернобобовых культур // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 23–27. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>
5. Шишин Д. А. Влияние конструкции очесывающего устройства на характеристики воздушного потока в камере очеса льнокомбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 6. С. 12–16. EDN: YUKBRB
6. Очес растений на корню с предварительной сепарацией свободного зерна / В. Н. Ожерельев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 1. С. 73–79. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>
7. Рабочий орган для очесывания верхушек растений : патент А 482143 СССР / Повиляй В. М., Шабанов П. А. № 198648/30-15 ; заявл. 16.01.74 ; опубл. 30.08.75. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU482143A1_19750830?ysclid=lsltjy3xwm696606053. (дата обращения: 25.01.2024).
8. Гребенка очесывающего устройства : патент 2439871 С1 Российская Федерация / В. П. Колинко [и др.]. № 2010129501/13 ; заявл. 15.07.2010 ; опубл. 20.01.2012. EDN: ZGFPTV
9. Съемная гребенка барабана очесывающего оборудования : патент 2442313 Российская Федерация / Бурьянов А. И. [и др.]. № 2009149613/13 ; заявл. 30.12.2009 ; опубл. 10.07.2011. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2442313C2_20120220.pdf (дата обращения: 25.01.2024).
10. Великанова И. В. Повышение эффективности системы машин при использовании интенсивных технологий выращивания льна-долгунца // Аграрный вестник Урала. 2021. № 1 (204). С. 70–80. EDN: ASKJWN
11. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting / J. Mańkowski [et al.] // Journal of Natural Fibers. 2017. Vol. 15, Issue 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
12. Романенко В. Ю., Соловьёв С. В. К анализу процесса очеса льна-долгунца на корню // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 3 (35). С. 189–198. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141680>
13. Научные аспекты повышения эффективности процессов очеса семенных коробочек при двухфазной уборке льна-долгунца / Ю. Ф. Лачуга [и др.] // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 53–58. <https://doi.org/10.31857/S2500262722010094>



14. Уткин А. А., Малышкин А. В. Использование кондуктометрического метода при определении влажности тресты льна // Техника и оборудование для села. 2023. № 11 (317). С. 22–27. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-22-27>
15. Романенко В. Ю. Экспериментальное обоснование режимов работы адаптера для подборщика-оборачивателя ленты льна // Техника и оборудование для села. 2017. № 9. С. 20–21. EDN: ZHJXGT
16. Галкин А. В., Фадеев Д. Г., Ушаповский И. В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 389–399. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
17. Effects of Humic Substances Obtained from Shives on Flax Yield Characteristics / S. Belopukhov [et al.] // Journal of Natural Fibers. 2017. Vol. 14, Issue 1. P. 126–133. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1167648>
18. Теория планирования многофакторных экспериментов / сост. А. Ф. Бойко, М. Н. Воронкова. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. 75 с. EDN: RTDZDP
19. Машины и оборудование для уборки и переработки технических культур : каталог / И. Г. Голубев, Н. П. Мишуров, В. Ф. Федоренко [и др.]. М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 80 с. URL: <https://clck.ru/3C4Jj4> (дата обращения: 25.01.2024).

REFERENCES

1. Chernikov V.G., Romanenko V.Yu., Androshehuk V.S., Shishin D.A. Ways to Improve the Reliability of Flax Harvesting Machines. *Machinery and Equipment for the Village*. 2017;2:30–33. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XXRSML
2. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Solovyov S.V. Study on Parameters and Operating Modes of the Device for Deseeding Flax in the Field. *Agricultural Machinery and Technology*. 2021;15(2):13–18. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-13-18>.
3. Ignatov V.D., Rostovtsev R.A., Mkrtchyan S.R., Golubev S.V., Perov G.A. [A Method of Flax Harvesting and a Multifunctional Unit for its Implementation]. Patent 2693728 Russian Federation. 2019 July 04. (In Russ.) Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2693728C1_20190704.pdf (accessed 25.01.2024).
4. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Improving the Design of Combing Devices for Harvesting Legumes. *Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "V. P. Goryachkin Moscow State Agroengineering University"*. 2018;2(84):23–27. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>.
5. Shishin D.A. Influence of the Deseeding Device Design on the Air Flow Characteristics in the Combing Chamber of the Flax Harvester. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;6:12–16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YUKBRB
6. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V., Sinyaya N.V., Chaplygin M.Y., Fedina T.O. Combing the Standing Crops with Preliminary Separation of Loose Grains. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(1):73–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>
7. Povilai V.M., Shabanov P.A. [Working Body for Combing the Tops of Plants]. Patent A 482143 USSR. 1975 August 30. (In Russ.) Available at: https://yandex.ru/patents/doc/SU482143A1_19750830?ysclid=lsltjy3xwm696606053 (accessed 25.01.2024).
8. Kolinko V.P., Ozonov G.R., Sabashkin V.A., Gritsenko N.F., Chemodanov S.I., Kolinko P.V., et al. [Comb of the Combing Device]. Patent 2439871 C1 Russian Federation. 2012 January 20. (In Russ.) EDN: ZGFPTV
9. Bur'janov A.I., Pakhomov V.I., Dmitrenko A.I., Bur'janov M.A., Kolesnikov G.E. [Doffer Comb of Stripping Cylinder]. Patent 2442313 Russian Federation. 2011 October 7. (In Russ.) Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2442313C2_20120220.pdf (accessed 25.01.2024).
10. Velikanova I.V. Increasing the Efficiency of the Machine System Using Intensive Technologies for Growing Flax. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021;1(204):70–80. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ASKJWN
11. Mańkowski J., Maksymiuk W., Spsychalski G., Kołodziej J., Kubacki A., Kupka D., et al. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2017;15(1):53–61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>.

12. Romanenko V.Yu., Solovyov S.V. To the Analysis of the Process of Combing Fiber Flax on the Root. *Tauride Bulletin of Agrarian Science*. 2023;3(35):189–198. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141680>.
13. Lachuga Yu.F., Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Scientific Aspects of Improving the Efficiency of Seedpod Combing Processes in Two-Phase Harvesting of Flax. *Russian Agricultural Science*. 2022;1:53–58. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2500262722010094>.
14. Utkin A.A., Malyshev A.V. Use of the Conductometric Method for Measuring the Moisture Content of Flax Straw. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;11(317):22–27. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-22-27>.
15. Romanenko V.Yu. Experimental Substantiation of Adapter Operating Modes for Pickup-Turner of Flax Tape. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017;9:20–21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZHJXGT.
16. 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.) <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>.
17. Belopukhov S., Dmitrevskaya I., Grishina E., Zaitsev S., Uschapovsky I. Effects of Humic Substances Obtained from Shives on Flax Yield Characteristics. *Journal of Natural Fibers*. 2017;14(1):126–133. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1167648>.
18. Boyko A.F., Voronkova M.N. [Theory of Planning Multifactorial Experiments]. Belgorod : Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2020. 75 p. (In Russ.) EDN: RTDZDP.
19. Golubev I.G., Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Davydova S.A., Solovyov S.A., Popov R.A. [Machines and Equipment for Harvesting and Processing of Industrial Crops : Catalog]. M. : FSBI “Rosinformagrotech”, 2021. 80 p. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3C4Jj4> (accessed 25.01.2024).

Об авторах:

Соловьёв Сергей Викторович, аспирант, и. о. младший научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8461-3888>, Researcher ID: KAM-7131-2024, s.solovyov@fncl.ru

Черников Виктор Григорьевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (17041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-4883>, v.chernikov@fncl.ru.

Ростовцев Роман Анатольевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>, r.rostovtsev@fncl.ru

Романенко Владислав Юрьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7273-3009>, Researcher ID: KAU-6551-2024, v.romanenko@fncl.ru.

Заявленный вклад авторов:

С. В. Соловьёв – литературный и патентный анализ, проведение исследований и обработка экспериментальных данных, подготовка начального текста с последующей доработкой.

В. Г. Черников – формулирование концепции решения, научное руководство, критический анализ результатов исследования, разработка и доработка решения.

Р. А. Ростовцев – постановка задачи, анализ результатов, визуализация.

В. Ю. Романенко – определение методологии исследования, сбор и анализ материалов по теме исследования, проведение исследований, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 16.02.2024; поступила после рецензирования 18.04.2024;
принята к публикации 26.04.2024*

*About the authors:*

Sergey V. Solovyov, Postgraduate Student, Acting Junior Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8461-3888>, Researcher ID: **KAM-7131-2024**, s.solovyov@fncl.ru

Viktor G. Chernikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-4883>, v.chernikov@fncl.ru

Roman A. Rostovtsev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>, r.rostovcev@fncl.ru

Vladislav Yu. Romanenko, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7273-3009>, Researcher ID: **KAU-6551-2024**, v.romanenko@fncl.ru

Authors contribution:

S. V. Solovyov – literary and patent analysis, conducting research and processing experimental data, preparing the initial text with subsequent revision.

V. G. Chernikov – formulation of the concept of the solution, scientific guidance, critical analysis of the research results, development and refinement of the solution.

R. A. Rostovtsev – problem statement, analysis of the results, visualization.

V. Yu. Romanenko – definition of the research methodology, collection and analysis of materials on the research topic, conducting research, refining the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 16.02.2024; revised 18.04.2024; accepted 26.04.2024



Отделение легких примесей из очесанного вороха в корпусе адаптера

В. Ю. Савин¹, В. Н. Ожерельев², В. В. Никитин²✉

¹ Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»

(г. Калуга, Российская Федерация)

² Брянский государственный аграрный университет
(с. Кокино, Российская Федерация)

✉ viktor.nike@yandex.ru

Аннотация

Введение. Повысить сепарирующую способность свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна возможно за счет удаления из очесанного вороха большей части легких примесей посредством инерционной системы очистки, смонтированной в корпусе очесывающего адаптера.

Цель исследования. Разработать инерционную систему очистки легких примесей в корпусе очесывающей жатки и оптимизировать ее основные параметры.

Материалы и методы. Объектом исследования стала масштабная модель пневмоочистительного устройства, имитирующая рабочий процесс движения воздуха и компонентов очесанного зернового вороха внутри корпуса очесывающего адаптера. Эксперимент был спланирован как двухфакторный с тремя уровнями варьирования скорости воздушного потока (4,5; 5,5; 6,5 м/с) и ширины воздушного канала (0,26; 0,29; 0,32 м). Исследования были проведены на очесанном ворохе пшеницы сорта Московская 56 влажностью порядка 12 %. В качестве параметра оптимизации и отклика функции была выбрана выделенная из корпуса установки с воздушным потоком доля очесанного вороха.

Результаты исследования. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что скорость воздушного потока оказывает большее влияние на выделение половы, чем ширина воздушного канала. Одновременное увеличение этих факторов приводит к увеличению параметра оптимизации, то есть к улучшению сепарации. Таким образом, если увеличение скорости воздушного потока обеспечивает стабильное увеличение доли выделенного вороха и ограничивается только скоростью, при которой в выделенном ворохе вместе с половыми появляется зерно, то изменение ширины канала позволяет достоверно достичь зоны оптимума параметра.

Обсуждение и заключение. Использование инерционной системы очистки позволяет практически полностью удалить легкие примеси из очесанной хлебной массы. Оптимальными параметрами устройства являются: ширина канала – 0,28...0,3 м, скорость воздушного потока – 6...6,5 м/с.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, очесывающий адаптер, очес растений на корню, инерционная система очистки, сепарация легких примесей, скорость воздушного потока

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



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



Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Для цитирования: Савин В. Ю., Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Отделение легких примесей из очесанного вороха в корпусе адаптера // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 370–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.370-387>

Separating Light Impurities from the Combed Heap in the Adapter Case

V. Yu. Savin^a, V. N. Ozherelev^b, V. V. Nikitin^b✉

^a Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University
(Kaluga, Russian Federation)

^b Bryansk State Agrarian University
(Kokino, Russian Federation)

✉ viktor.nike@yandex.ru

Abstract

Introduction. It is possible to increase the separating of loose grain on the lattice bottom of the combine harvester feeder house by removing most of the light impurities from the combed heap using an inertial cleaning system built into the combing adapter body.

Aim of the Study. The study is aimed at developing an inertial system for separating light impurities in the combing header body and optimizing its main parameters.

Materials and Methods. The object of the study was a large-scale model of a pneumatic cleaning device to simulate the motion of air and components of a combed grain heap inside the combing adapter body. It was a two-factor experiment with three variations of the air flow velocity (4.5; 5.5; 6.5 m/s) and the width of the air channel (0.26; 0.29; 0.32 m). The studies were conducted on a combed heap of Moskovskaya 56 wheat with a moisture content of about 12%. As a parameter for optimization and response function, a portion of the combed heap was selected from the body of the installation with an air flow.

Results. According to the results of the experimental studies, it was found that the air flow velocity has a greater effect on separating glumes than the width of the air channel. A simultaneous increase in both factors leads to an improved separation. At the same time, if increasing the air flow velocity ensures a stable increase in the proportion of the combed heap and is limited only by the air velocity at which grain appears in the combed heap along with the glumes, then changing the channel width allows achieving the parameter optimal value.

Discussion and Conclusions. The use of an inertial cleaning system makes it possible to remove almost completely light impurities from the combed heap. The optimal parameters of the device are: channel width 0.28...0.3 m, air flow velocity 6...6.5 m/s.

Keywords: combine harvester, combing adapter, combing of standing plants, inertial cleaning system, separation of light impurities, air flow velocity

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

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

For citation: Savin V.Yu., Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Separating Light Impurities from the Combed Heap in the Adapter Case. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):370–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.370-387>

Введение. За последние годы зерновое хозяйство России сделало значительный шаг по направлению к совершенствованию как технологий, так и технической оснащенности производства. Тем не менее резервы оптимизации отрасли далеки от исчерпания. В частности, это касается уборочной техники. Так, ученые Федерального научного центра ВИМ считают, что большинство существующих зерноуборочных комбайнов, хотя бы по отдельным параметрам, далеки от гармоничных технических и технологических пропорций [1]. При этом речь идет о машинах, активное совершенствование которых во всем мире осуществляется непрерывно на протяжении последнего столетия.

Параллельно с совершенствованием конструкций зерноуборочных комбайнов, обеспечивающих осуществление традиционной технологии, в России и за рубежом периодически возобновляются работы по изысканию альтернативных вариантов уборки зерна [2–4]. С этой точки зрения к числу перспективных направлений следует отнести уборку зерна методом очеса растений на корню [5–7]. Технология показала свою привлекательность, в частности, с точки зрения возможности использования остающихся на поле после уборки стеблей для снегозадержания в степных районах Сибири и Северного Казахстана [8–10]. Главным же достоинством очеса является перспектива существенного уменьшения энергоемкости уборки в связи с тем, что до 70 % энергии в традиционном молотильном аппарате расходуется на деформацию и дробление соломы¹ [11–13].

Несмотря на отмеченные выше преимущества, внедрение технологии очеса сдерживается тем, что современные зерноуборочные комбайны не приспособлены к эффективной доработке очесанного зернового вороха, в котором содержится до 80 % свободного зерна² [14]. Не обусловленное технологической потребностью динамическое воздействие на свободное зерно бичей барабана приводит как к излишнему дроблению продукции, так и к непроизводительному расходу энергии (расход порядка 10 кВт излишней мощности для комбайна типа «Вектор»).

В связи с этим целесообразно выделить большую часть свободного зерна из вороха до поступления последнего в молотильное устройство и направить зерно непосредственно в систему очистки. Установлено, что сепарацию можно осуществить непосредственно в наклонной камере, для чего ее днище должно быть решетчатым [15–17]. При этом целесообразно предварительно удалить из очесанного вороха легкие примеси, сопоставимые по размерам со свободным

¹ Пустыгин М. А. Теория и технологический расчет молотильных устройств. М. : ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. 96 с.

² Леженкин А. М., Кравчук В. И., Кушнарев А. С. Технология уборки зерновых методом очесывания на корню: состояние и перспективы. Дослідницьке, 2010. 400 с.



зерном, поскольку содержащиеся в нем 10–15 % половы (по массе) дают увеличение сепарируемого объема примерно в два раза. В результате сепарирующая способность отверстий решетчатого днища может существенно снизиться, вследствие конкуренции зерна и половы за проход сквозь них. В связи с этим актуальной задачей является изыскание возможности удаления легких примесей из очесанного вороха до его поступления в наклонную камеру.

Обзор литературы. В зерноуборочном комбайне выделение легких примесей происходит путем воздействия на них воздушного потока, обладающего определенной скоростью [18–20]. В результате имеющие большую по сравнению с зерном парусность легкие примеси выносятся воздушным потоком за пределы комбайна. Если же рассматривать процесс сепарации зерна в зерноочистительных машинах, то в них может реализовываться также инерционное и гравитационное отделение легких примесей в осадочной камере³.

Что касается дополнительного выделения легких примесей (пыли) в зерноуборочном комбайне, то кроме традиционной системы очистки в отдельных комбайнах фирмы CLAAS предусмотрен отсос пыли непосредственно из наклонной камеры⁴. При этом следует иметь в виду, что цель этого мероприятия не технологическая, а чисто вспомогательная. По мнению разработчиков, удаление пыли из зоны перед лобовым стеклом кабины существенно улучшает условия труда механизатора. С точки зрения решения нашей задачи совместить отсос легких примесей с гравитационной сепарацией зерен сквозь отверстия решетчатого днища затруднительно, поскольку зерновки могут начать витать в восходящем воздушном потоке, вследствие чего эффективность сепарации уменьшится.

Более приемлемым представляется вариант использования инерционной системы очистки непосредственно в корпусе адаптера. Предполагается, что ее основу должны составлять жалюзийные решетки, сориентированные соответствующим образом по отношению к направлению воздушного потока, генерируемого очесывающим барабаном [21; 22]. В качестве аналога могут служить инерционные пылеотделители, которыми снабжены зерноочистительные машины типа ОВС-25⁵.

При более глубоком изучении геометрических параметров корпуса очесывающего адаптера был сделан вывод о том, что имеющиеся соотношения между сечениями воздушного потока в разных зонах позволяют ориентироваться на формирование полноценной осадочной камеры, способной отделять относительно крупные частицы половы, сопоставимые по размерам с зерновками.

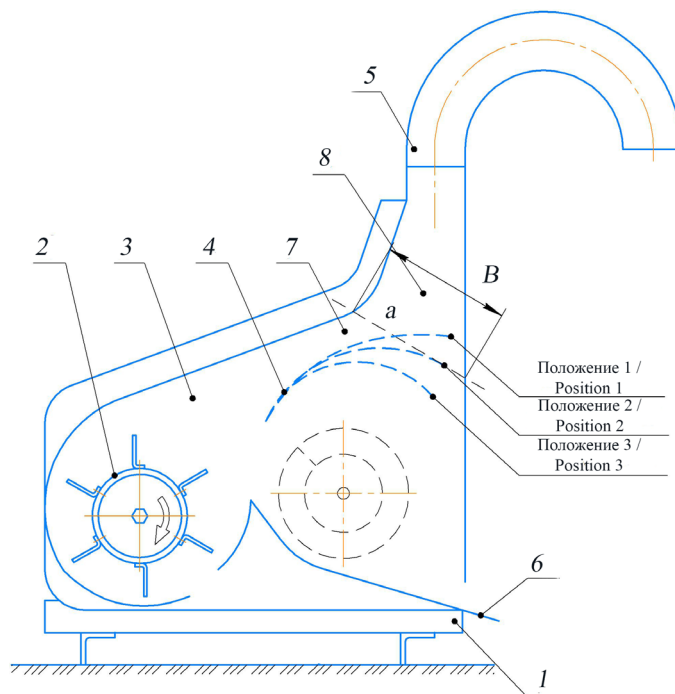
В связи с этим целью исследования является оценка достоверности выдвинутой гипотезы и оптимизация параметров процесса с точки зрения достижения максимальной эффективности сепарации половы.

³ Тарасенко А. П. Современные машины для послеуборочной обработки зерна и семян. М. : Колос-с, 2008. 232 с.

⁴ Приставки – Зерноуборочные комбайны CLAAS [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3Bvy3v> (дата обращения: 04.04.2024).

⁵ Машины для послеуборочной обработки зерна / В. С. Окнин [и др.]. М. : Агропромиздат, 1987. 238 с.

Материалы и методы. Объектом исследования является масштабная модель (1:2,25) пневмоочистительного устройства, имитирующая рабочий процесс движения воздуха и компонентов очесанного зернового вороха внутри корпуса очесывающего адаптера (рис. 1).



Р и с. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – рама; 2 – имитатор очесывающего барабана; 3 – корпус;
4 – щиток направляющий; 5 – воздуховод; 6 – щиток наклонный;
7 – вход в осадочную камеру; 8 – камера осадочная

F i g. 1. Scheme of the experimental installation:
1 – frame; 2 – simulator of the combing drum; 3 – body;
4 – guide flap; 5 – air duct; 6 – inclined flap;
7 – entrance to the sedimentary chamber; 8 – sedimentary chamber

Источник: составлено авторами статьи.

Source: is compiled by the authors.

На раме 1 смонтирован корпус 3, в котором размещен барабан 2 с шестью лопастями, имитирующий пневматические параметры воздушного потока, генерируемого очесывающим устройством реального адаптера. Справа от барабана 2 смонтирован криволинейный направляющий щиток 4, который может быть зафиксирован в одном из трех возможных положений (показаны пунктирными линиями). Ниже смонтирован наклонный (скатный) щиток 6. Таким образом, формируется зона сужения воздушного потока 7 на входе в осадочную камеру 8, причем ширина B последней может варьироваться посредством изменения положения направляющего щитка 4 относительно корпуса 3. Загрузочное устройство

размещено на боковой стенке, поэтому на схеме не показано. Ширину канала определяли через касательную a , построенную в среднем положении (2) направляющего щитка 4 для его крайней правой точки. Для двух других положений (1 и 3) – аналогичным образом и параллельно касательной a .

В натуральном виде экспериментальное устройство представлено на рисунке 2.



Р и с. 2. Экспериментальное устройство
(боковая стенка вместе с загрузочным устройством демонтированы)

F i g. 2. Experimental device
(the side wall together with the loading device are dismantled)

Источник: фотография сделана при проведении исследований по отделению легких примесей в корпусе экспериментального устройства. Автор фотографии В. Ю. Савин, 2024 г.

Source: the photograph is taken by V.Yu. Savin during the research on the separating light impurities in the body of the experimental device, 2024.

Технологический процесс в экспериментальной установке осуществляется следующим образом. Подаваемый через загрузочное устройство объем вороха попадает на лопасти имитатора 2 очесывающего барабана, которые генерируют воздушный поток, одновременно сообщая компонентам вороха импульс движения, сориентированный преимущественно по касательной к цилиндрической поверхности. В момент швыряния очередной порции вороха за счет варьирования положения точек контакта его отдельных частиц с лопастями барабана 2 и разной парусности компонентов в пространстве формируется расширяющийся «факел», состоящий из зерна, колосьев и частиц соломы. Наиболее тяжелые зерновки,

к тому же получившие импульс движения меньшей величины, концентрируются в нижнем слое потока, проходя при этом ниже направляющего щитка 4. В результате они выпадают на наклонный щиток 6, с которого соскальзывают за пределы корпуса 3.

Более легкие компоненты (либо тяжелые, но получившие импульс движения максимальной величины), подхваченные еще и воздушным потоком, проходят над поверхностью направляющего щитка 4, поступая, таким образом, в зону расширения или осадочную камеру 8. Здесь на компоненты вороха действуют силы инерции, вследствие чего наиболее тяжелые из них продолжают движение вперед, тогда как полова изменяет свою траекторию, следуя за воздушным потоком в воздуховод 5. Кроме того, в камере 8 (в связи с расширением потока) скорость воздуха резко уменьшается, что способствует выпадению из него наиболее тяжелых компонентов вороха. Таким образом, реализуется пневмогравитационная сепарация очесанного вороха.

Тяжелые компоненты (зерно и недомолоченные колосья), обладающие меньшей парусностью, попадают в экспериментальной установке на наклонный щиток 6 и выводятся за пределы ее корпуса 3. В реальном очесывающем адаптере они должны оседать на шнек (изображен на рисунке 1 пунктирными линиями) и далее поступать в наклонную камеру. Имеющая большую парусность полова должна быть выброшена через воздуховод 5 за пределы корпуса 3 (или корпуса очесывающего адаптера). Очевидно, что эффективность процесса сепарации во многом зависит от скорости воздушного потока в наиболее узкой части воздушного канала, обозначенной на схеме буквой *a* (рис. 1). Ее оптимальная величина должна соотноситься с парусностью разделяемых компонентов вороха, характеризующейся скоростью их витания.

В соответствии с изложенной выше гипотезой технологического процесса сепарации эксперимент спланировали как двухфакторный с варьированием скорости воздушного потока V (м/с) и ширины B воздушного канала в зоне его максимального расширения (м). Для контроля основных и вспомогательных параметров были использованы следующие измерительные приборы и оборудование: штангенциркуль ШЦ 1-125 ГОСТ 166-80; микроманометр ММН-2400(5)-1,0; трубка полного давления; весы лабораторные ВЛТЭ-210/510; складной метр ТУ 3936-034-00220836-98; рулетка измерительная металлическая Р5У2П; индикатор часового типа И ИЧС 0-5 мм ТУ 2-034-622-74; тахометр Актаком АТЕ-6034.

Экспериментальная установка приводилась в движение клиноременной передачей от мотокультиватора Pubert Elite 55 НС 2. Вследствие этого варьирование частоты вращения имитатора 2 очесывающего барабана осуществлялось изменением частоты вращения коленчатого вала двигателя мотокультиватора, а также перестановкой клинового ремня на соответствующий ручей приводного шкива.

На предварительном этапе исследования было проведено определение доли половы в очесанном ворохе, который предполагалось сепарировать на экспериментальной установке. Из различных частей емкости с предварительно собранным в результате работы очесывателя ворохом брали четыре пробы по 0,1 кг каждая. Их вручную разделяли на следующие фракции: свободное зерно, колоски

и части колосков, солома. В результате получены следующие соотношения между фракциями вороха: свободное зерно – 69 %; колоски и части колосков – 18 %; солома – 18 %. Таким образом, при проведении основных экспериментальных исследований естественным пределом и показателем эффективности процесса (откликом) должна быть массовая доля удаленной соломы, стремящаяся в пределе к 18 % исходного материала. Очесанный ворох был отобран в Перемышльском районе Калужской области из под прицепного очесывающего устройства (на базе КИР-1,5А).

Опыты установочной серии проводили в следующей последовательности. Формировали навески очесанного вороха установленного фракционного состава массой по 0,2 кг. Затем снимали переднюю панель корпуса 3 и устанавливали направляющий щиток 4 в первое положение (рис. 1). Возвращали переднюю панель корпуса в исходное положение и устанавливали приводной ремень в необходимый ручей шкива, обеспечивая требуемую (предположительно) частоту вращения барабана 2. Запускали экспериментальную установку и измеряли скорость воздуха в характерной зоне, при необходимости регулируя ее посредством изменения частоты вращения барабана 2. Под выход воздуховода 5 устанавливали приемный контейнер, после чего подавали в загрузочное устройство порцию очесанной массы, собирали и взвешивали уловленный ворох. В первую очередь контролировали состав выделенного с воздушным потоком вороха на предмет отсутствия в нем зерна. Затем фиксировали выделенную долю очесанного вороха. Повторяли опыт еще два раза. Далее, в соответствии с планом эксперимента, опыты проводили в трех повторностях при каждом из трех положений направляющего щитка 4, минимизируя таким образом разборочно-сборочные работы.

В соответствии с целью исследования в качестве параметра оптимизации и отклика функции выбрали выделенную из корпуса установки с воздушным потоком долю очесанного вороха δ , %. Данный параметр оптимизации удовлетворяет необходимым требованиям: является количественным, то есть задается числом; имеет множество значений – область определения; может быть измерен; является однозначным в статическом смысле; обладает универсальностью и полнотой.

После назначения параметра оптимизации приняли факторы, предположительно оказывающие наибольшее влияние на процесс. Как было отмечено выше, к таковым отнесены скорость воздушного потока (V) и ширина воздушного канала (B). Принятые факторы в полной мере являются управляемыми в связи с тем, что, выбрав нужное значение фактора, можно поддерживать его постоянным в течение всего опыта.

Уравнение функции отклика в общем виде должно выглядеть следующим образом:

$$\delta = f(V, B). \quad (1)$$

Ограничение области определения фактора скорости воздушного потока V носит принципиальный характер. Требуемая скорость воздушного потока в каналах пневмотранспортных установок определяется скоростью витания транспортируемого

материала и коэффициентом, зависящим от сложности схемы транспортера φ . Так, скорость витания половы варьируется в пределах от 0,67 до 3,10 м/с, а коэффициент $\varphi = 1,5...3,7^6$. При этом скорость воздушного потока должна быть ограничена критической величиной, при которой начнет происходить выброс зерна. Верхними ограничивающими параметрами для воздушного потока являются минимальные значения скорости витания зерна и соответствующий коэффициент φ . Согласно с диапазонами изменения указанных параметров установили область определения скорости воздушного потока в пределах $V = 4,5...6,5$ м/с.

Ограничение области определения фактора ширины канала B носит технический характер. Здесь мы ориентируемся на размеры рабочей камеры очесывающей жатки «Озон» как одной из наиболее распространенных жаток [23; 24], принятые конструктивные решения экспериментальной жатки и на соответствующие размеры экспериментальной установки. На этой основе диапазон изменения ширины канала приняли равным $B = 0,26...0,32$ м.

После формирования областей определения факторов необходимо установить интервалы и основные уровни их варьирования. Число уровней факторов определяется степенью предполагаемой полиномиальной модели функции отклика. Поскольку базовые теоретические положения пневматического транспортирования свидетельствуют о нелинейной зависимости производительности установки от диаметра трубопровода, то в качестве аппроксимирующей линии должна быть принята кривая второго порядка, то есть аппроксимирующей функцией (предположительно) должен быть полином второй степени. В соответствии с этим число уровней варьирования факторов должно быть равно: $u = 3$. Их численные значения представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1
Table 1

Условия проведения эксперимента
Conditions of the experiment

Уровни варьирования факторов / Variation grades	$x_1, (V), \text{м/с} /$ $x_1, (V), \text{m/s}$	$x_2, (B), \text{м} /$ $x_2, (B), \text{m}$
Верхний (+1) / Upper (+1)	6,5	0,32
Основной (0) / Main (0)	5,5	0,29
Нижний (–1) / Lower (–1)	4,5	0,26

Факторный эксперимент осуществили с помощью матрицы планирования, в которой использовали кодированные значения факторов. За исходную точку для построения плана эксперимента приняли сочетание основных уровней в условии эксперимента. При этом целесообразно ориентироваться на модель типа:

$$y = b'_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot \left(x_1^2 - \frac{2}{3} \right) + b_{22} \cdot \left(x_2^2 - \frac{2}{3} \right).$$

⁶ Красников В. В. Подъемно-транспортные машины в сельском хозяйстве. М. : Сельхозиздат, 1962. 440 с.



В результате была получена матрица ортогонального планирования эксперимента, представленная в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Матрица ортогонального планирования для двух факторов
Orthogonal planning matrix for two factors

Номер опыта / Experience Number	x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	$x_1^2 - 2/3$	$x_2^2 - 2/3$	y
1	+	+	+	+	1/3	1/3	y_1
2	+	–	+	–	1/3	1/3	y_2
3	+	+	–	–	1/3	1/3	y_3
4	+	–	–	+	1/3	1/3	y_4
5	+	+	0	0	1/3	–2/3	y_5
6	+	–	0	0	1/3	–2/3	y_6
7	+	0	+	0	–2/3	1/3	y_7
8	+	0	–	0	–2/3	1/3	y_8
9	+	0	0	0	–2/3	–2/3	y_9

Результаты исследования. Эксперимент был проведен на очесанном ворохе пшеницы сорта Московская 56 влажностью порядка 12 %. Результаты представлены в таблице 3 рабочих условий.

Таблица 3

Table 3

Таблица рабочих условий и результатов проведения экспериментов
Working table of conditions and results of experiments

Номер опыта / Experience Number	V , м/с / V , m/s	B , м / B , m	δ , %
1	+	+	13,50
2	–	+	8,42
3	+	–	11,08
4	–	–	8,10
5	+	0	14,50
6	–	0	10,16
7	0	+	11,50
8	0	–	9,83
9	0	0	12,16

Матрица плана эксперимента с результатами измерения выделенной доли очесанного вороха приведена в виде таблицы 4.

Результирующая матрица проведенного эксперимента
The resulting matrix of the experiment

Номер опыта / Experience Number	x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	$x_1^2 - 2/3$	$x_2^2 - 2/3$	y
1	+	+	+	+	1/3	1/3	13,50
2	+	—	+	—	1/3	1/3	8,42
3	+	+	—	—	1/3	1/3	11,08
4	+	—	—	+	1/3	1/3	8,10
5	+	+	0	0	1/3	–2/3	14,50
6	+	—	0	0	1/3	–2/3	10,16
7	+	0	+	0	–2/3	1/3	11,50
8	+	0	—	0	–2/3	1/3	9,83
9	+	0	0	0	–2/3	–2/3	12,16

Обсуждение и заключение. Для регрессионного анализа результатов (построения регрессионной модели) использованы встроенные функции программы Microsoft Excel. Группа инструментов «Пакет анализа» позволяет значительно сократить время и трудоемкость обработки данных как по сравнению с ручной обработкой данных, так и по сравнению с использованием базовых электронных таблиц программы Microsoft Excel [25; 26]. На рисунке 3 приведены результаты регрессионного анализа.

ВЫВОД ИТОГОВ / OUTPUT OF RESULTS

<i>Регрессионная статистика / Regression statistics</i>	
Множественный R / Multiple R	0,99735984
R-квадрат / R-square	0,99472666
Нормированный R-квадрат / Normed R-square	0,98593776
Стандартная ошибка / Standard error	0,25591521
Наблюдения / Observations	9

Дисперсионный анализ / Analysis of variance					
	df	SS	MS	F	Значимость F / F Importance
Регрессия / Regression	5	37,06221111	7,412442222	113,1798564	0,001294028
Остаток / Residual	3	0,196477778	0,065492593		
Итого / Total	8	37,25868889			

	<i>Коэффициенты / Coefficients</i>	<i>Стандартная ошибка / Standard error</i>	<i>t-статистика / t-statistics</i>	<i>P-Значение / P-value</i>	<i>Нижние 95 % / Low 95%</i>	<i>Верхние 95 % / Upper 95%</i>	<i>Нижние 95 % / Low 95%</i>	<i>Верхние 95 % / Upper 95%</i>
Y-пересечение / Y-intersection	11,0288889	0,085305069	129,2876152	1,02025E-06	10,75741009	11,30036769	10,75741009	11,30036769
Переменная X 1 / Variable X1	2,066666667	0,104476945	19,7810786	0,000282319	1,734174398	2,399158935	1,734174398	2,399158935
Переменная X 2 / Variable X2	0,735	0,104476945	7,035044889	0,0005901313	0,402507731	1,067492269	0,402507731	1,067492269
Переменная X 3 / Variable X 3	0,525	0,127957603	4,102921499	0,02201224	0,117781799	0,932218201	0,117781799	0,932218201
Переменная X 4 / Variable X 4	-0,2066667	0,180959377	-1,142061105	0,33634728	-0,78256169	0,369226836	-0,78256169	0,369226836
Переменная X 5 / Variable X 5	-1,8716667	0,180959377	-10,34302114	0,001927984	-2,447560169	-1,295773169	-2,447560169	-1,295773169

Р и с. 3. Результаты регрессионного анализа
F i g. 3. Regression analysis results

Источник: составлено авторами статьи.

Source: is compiled by the authors.

Коэффициент детерминации уравнения регрессии составил $R^2 = 0,994$. Модель с таким коэффициентом детерминации является вполне адекватной.

Множественный коэффициент корреляции R характеризует тесноту связи между зависимой переменной и предиктором. Дадим качественную оценку показателю тесноты связи. Множественный коэффициент корреляции R , равный 0,997, по шкале Чеддока соответствует весьма высокой степени связи между результирующим и факторными признаками.

На рисунке 3 в рамках результатов регрессионного анализа представлен также нормированный или скорректированный коэффициент детерминации, равный 0,985. Обращает на себя внимание близость скорректированного и нескорректированного коэффициентов детерминации. Эти показатели велики и различаются незначительно, что указывает на адекватность модели.

О высокой степени адекватности модели можно судить и по величине F , которая равна 0,0012, что меньше уровня значимости 0,05. Это также свидетельствует о том, что полученная модель в целом статистически значима.

После подстановки значений полученных коэффициентов регрессии уравнение (1) принимает вид:

$$y = 11,029 + 2,067 \cdot x_1 + 0,735 \cdot x_2 + 0,525 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,207 \cdot \left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right) - 1,872 \cdot \left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right). \quad (2)$$

Анализ p -значений (рис. 3) свидетельствует о том, что коэффициент b_{11} можно признать статистически незначимым и исключить из уравнения регрессии.

Первичный анализ полученной модели позволяет сделать вывод о том, что скорость воздушного потока V оказывает большее влияние на выделение пыли, чем ширина воздушного канала B . Одновременное увеличение этих факторов приводит к увеличению параметра оптимизации, то есть к улучшению сепарации.

Такое уравнение неудобно для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому его преобразовали по формулам перехода (3) от кодированных к натуральным значениям факторов:

$$x_1 = \frac{V - V_0}{\Delta V}, \quad x_2 = \frac{B - B_0}{\Delta B}, \quad (3)$$

где V_0, B_0 – натуральные значения факторов на основных уровнях; $\Delta V, \Delta B$ – шаг варьирования значений факторов.

В рассматриваемом случае расчетные формулы принимают вид:

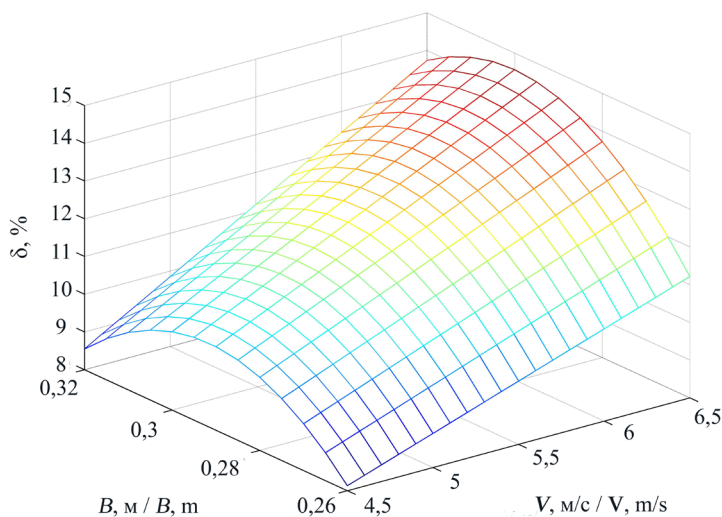
$$x_1 = \frac{V - 5,5}{1}, \quad x_2 = \frac{B - 0,29}{0,03}. \quad (4)$$

После подстановки выражений (4) в уравнение (2) последнее принимает следующий вид:

$$y = -153,204 - 3,008 \cdot V + 1134,64 \cdot B + 17,5 \cdot V \cdot B - 2079,99 \cdot B^2.$$

Адекватность модели подтвердила и ее проверка по критерию Фишера, поскольку $F = 1,19 < F_{\text{табл}} = 19,3^7$ [27; 28]. Таким образом, правомерно приступить к ее дальнейшему анализу.

Для этого, используя полученное уравнение, построили поверхность отклика (рис. 4) и ее контурный график (рис. 5). Графическая интерпретация модели была выполнена на ПЭВМ с использованием программного продукта MATLAB [29; 30].



Р и с. 4. Поверхность отклика (зависимость доли выделенной половы δ от скорости воздуха V и ширины B воздушного канала)

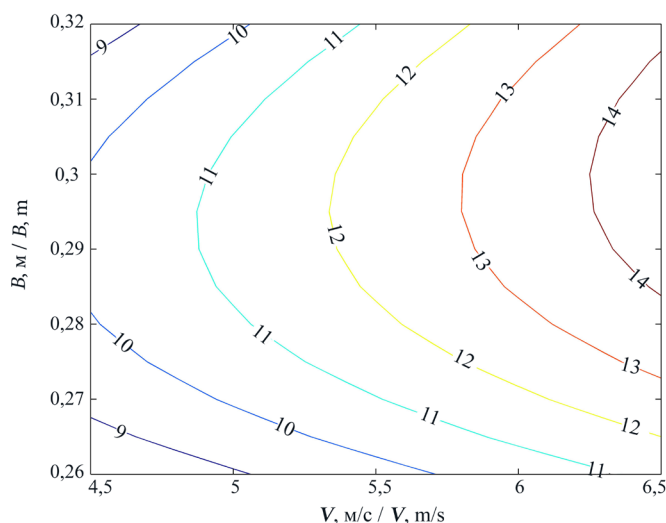
F i g. 4. The response surface (dependence of the proportion of the selected sex δ from the air velocity V and the width B of the air channel)

Источник: составлено авторами статьи.

Source: is compiled by the authors.

Анализ полученной поверхности отклика и контурного графика (рис. 4, 5) свидетельствует о том, что ширина канала B наряду со скоростью воздушного потока также является достаточно значимым фактором. Если увеличение скорости воздушного потока обеспечивает стабильное увеличение доли выделенного вороха и ограничивается только скоростью, при которой в выделенном ворохе вместе с половой появляется зерно, то изменение ширины канала B позволяет достоверно достичь зоны оптимума параметра. Так, на данной поверхности отклика наблюдается явное повышение доли выделенной половы в зоне, соответствующей ширине канала $B = 0,28 \dots 0,3$ м. Дальнейшее увеличение ширины канала приводит к снижению доли выделенной половы. Это обусловлено чрезмерным снижением скорости воздуха в зоне резкого расширения воздушного канала δ (рис. 1), ведущим к «осаживанию» половы.

⁷ Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1984. 832 с.



Р и с. 5. Контурный график, характеризующий долю выделенной половы (от массы вороха) при изменении факторов V и B

F i g. 5. Contour graph characterizing the proportion of the selected sex (from the mass of the pile) with a change in factors V and B

Источник: составлено авторами статьи.

Source: is compiled by the authors.

Эффект взаимодействия факторов ширины канала и скорости воздушного потока выражен и оказывает некоторое влияние на общую картину изменения доли легких компонентов вороха, выделенных вместе с воздухом.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Удаление из очесанного зернового вороха большей части легких компонентов вороха непосредственно в корпусе адаптера возможно без потери свободного зерна;
2. Анализ полученной поверхности отклика позволяет выделить оптимальные диапазоны варьирования факторов: ширина канала $B = 0,28...0,3$ м, скорость воздушного потока $V = 6...6,5$ м/с. При сочетании указанных значений факторов доля выделенных легких компонентов вороха приближается к ее исходному содержанию в нем, то есть к 18 % (или около 100 % от фактической массы легких примесей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 403–416. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
2. On the Substantiation of the Technological Scheme of the Combine Harvester with the Stationary Process of Threshing Bread Mass / A. S. Ovchinnikov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 488. Article no. 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012057>
3. Buryanov A. I., Chervyakov I. V. Using Combines for Cleaning Grain Crops by Non-Traditional Technologies // INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 59, Issue 3. P. 27–32. URL: <https://clck.ru/3CBQ4B> (дата обращения: 04.04.2024).

4. Беренштейн И. Б., Мельник Д. Ю. Техничко-экономическая оценка технологий уборки зерновых культур методом очеса растений на корню // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2016. № 6 (169). С. 67–73. EDN: [YKQQPN](#)
5. Оценка технологии уборки зерновых культур методом очеса на корню / Р. В. Даманский [и др.] // Вестник Омского ГАУ. 2023. № 1 (49). С. 145–151. EDN: [QIZZSG](#)
6. Даманский Р. В. Оптимизация технологического процесса уборки зерновых культур методом очеса растений на корню // Вестник Омского ГАУ. 2023. № 2 (50). С. 137–142. EDN: [BWMHPK](#)
7. Perspectives of Grain Pile Separation Before it Enters the Thresh-ER / V. N. Ozherelyev [et al.] // International Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 7. P. 114–116. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>
8. Chaplygin M. E., Pekhalskiy I. A., Tronev S. V. The Choice of Combine Harvesters and Their Adapters for the Conditions of Northern Kazakhstan // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 3. P. 74–76. EDN: [AHZGML](#)
9. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan / V. L. Astafyev [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 3. P. 46–51. URL: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (дата обращения: 04.04.2024).
10. Increase in Soil Moisture Reserves Due to the Formation of High Stubble Residues for the Accumulation of Snow Precipitation / M. Konstantinov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. Article no. 052049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>
11. Chaplygin M. E., Tronev S. V., Davydova S. A. Soybean Harvesting Using Current Dedicated Headers and Adapters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659. Article no. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012014>
12. Adaptation of Threshing Devices to Physical and Mechanical Characteristics of Harvested Crops / Yu. F. Lachuga [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2020. Vol. 46, Issue 2. P. 198–201. <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
13. Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 190–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>
14. Исследование параметров очесанного зернового вороха / В. Н. Ожерельев [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 1. С. 7–9. EDN: [TZNNGD](#)
15. Наклонная камера зерноуборочного комбайна : патент 1687078 СССР / Дементьев А. В. [и др.]. № 4689013/15 ; заявл. 12.05.1989 ; опубл. 30.10.1991. URL: <https://patents.su/4-1687078-naklonnaya-kamera-zernouborochno-go-kombajina.html> (дата обращения: 04.04.2024).
16. Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Сепарация очесанного зернового вороха на решетчатом днище наклонной камеры комбайна // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 35–40. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>
17. Очес растений на корню с предварительной сепарацией свободного зерна / В. Н. Ожерельев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 1. С. 73–79. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>
18. Наклонная камера зерноуборочного комбайна : патент 2577892 Российская Федерация / Ожерельев В. Н., Никитин В. В. № 2014145875/13 ; заявл. 14.11.2014 ; опубл. 20.03.2016. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/49/47/cd/d5155d2f471138/RU2577892C1.pdf> (дата обращения: 04.04.2024).
19. Баран И. А., Попов В. Б. К вопросу о повышении производительности системы очистки самоходного зерноуборочного комбайна // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2023. № 1. С. 20–30. EDN: [WLRLVW](#)
20. Ловчиков А. П., Кулагин С. Н. Обоснование совершенствования ветро-решетной очистки зерноуборочного комбайна // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 1 (99). С. 185–189. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-99-1-185-188>
21. Устройство для обмола растений на корню : патент 2566017 Российская Федерация / Ожерельев В. Н., Никитин В. В. № 2014130712/13 ; заявл. 24.07.2014 ; опубл. 20.10.15.
22. Устройство для обмола растений на корню : патент 2756120 Российская Федерация / Ряднов А. И. № 2021102289 ; заявл. 01.02.2021 ; опубл. 28.09.2021.



23. Жалнин Э. В. Основные задачи внедрения очесывающих жаток «Озон» // Сельский механизатор. 2018. № 5. С. 10–11. EDN: **XWCSEH**
24. Савин В. Ю., Горбачёв И. В. Очесывающие устройства для уборки зерновых // Сельский механизатор. 2019. № 3. С. 8–10. EDN: **SBEUZC**
25. Муха В. С. Новые результаты в анализе многомерных данных: многомерно-матричный полиномиальный регрессионный анализ // Доклады БГУИР. 2019. № 3 (121). С. 57–64. EDN: **YVGART**
26. Ташкинов Ю. А. Прогнозирование образовательных результатов студентов инженерно-строительного вуза с использованием регрессионного анализа в среде MS Excel // Вестник Академии гражданской защиты. 2020. № 1 (21). С. 90–97. EDN: **ZYBCW**
27. Кравченко К. И., Минеева Т. А. Использование линейного коэффициента корреляции для определения характера связи между переменными // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 82 (2). С. 26–30. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2022-41>
28. Мансурова А. С. Сравнительный анализ методов проверки гипотезы об отсутствии тренда во временном ряду // Актуальные проблемы экономики современной России. 2016. № 3. С. 516–522. EDN: **WDCDPJ**
29. Польшакова Н. В., Александрова Е. В., Волобуева Т. А. Автоматизация обработки экспериментальных данных в агрономических исследованиях // Вестник аграрной науки. 2022. № 4 (97). С. 131–139. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.4.129>
30. Анисимова Г. Д., Евсеева С. И., Мышлянцева М. Д. Информационные технологии в преподавании математической статистики // Актуальные проблемы преподавания математики в техническом вузе. 2018. № 6. С. 15–20. EDN: **YOOUTJ**

REFERENCES

1. Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Improving the Design of Combine Harvesters by Harmonizing Their Basic Technical Parameters. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):403–416. (In Russ., abstract in Eng.). <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
2. Ovchinnikov A.S., Lovchikov A.P., Ryadnov A.I., Fedorova O.A., Konstantinov M.M., Fomin S.D. On the Substantiation of the Technological Scheme of the Combine Harvester with the Stationary Process of Threshing Bread Mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;488:012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012057>
3. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using Combines for Cleaning Grain Crops by Non-Traditional Technologies. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27–32. Available at: <https://clck.ru/3CBQ4B> (accessed 04.04.2024).
4. Berenstein I.B., Melnik D.Yu. Techno-Economic Evaluation of the Technologies of Harvesting of Grain Crops by the Method of Tow Plants at the Root. *News of Agricultural Science of Taurida*. 2016;6(169):67–73. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **YKQQPN**
5. Damanskij R.V., Chekusov M.S., Kem A.A., Mikhaltsov E.M., Schmidt A.N. Evaluation of the Technology of Harvesting Grain Crops by the Method of Combing the Standing Crops. *Vestnik of Omsk SAU*. 2023;1(49):145–151. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **QIZZSG**
6. Damanskij R.V. Optimization of the Technological Process of Harvesting Grain Crops by the Method of Combing Plants on the Vine. *Vestnik of Omsk SAU*. 2023;2(50):137–142. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **BWMHPK**
7. Ozherelyev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., Torikov V.V. Perspectives of Grain Pile Separation Before it Enters the Thresh-ER. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018;7:114–116. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.13.11622>
8. Chaplygin M.E., Pekhalskiy I.A., Tronev S.V. The Choice of Combine Harvesters and Their Adapters for the Conditions of Northern Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):74–76. EDN: **AHZGML**
9. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46–51. Available at: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465 (accessed 04.04.2024).

10. Konstantinov M., Glushkov I., Mukhamedov V., Lovchikov A. Increase in Soil Moisture Reserves Due to the Formation of High Stubble Residues for the Accumulation of Snow Precipitation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;666:052049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/5/052049>
11. Chaplygin M.E., Tronev S.V., Davydova S.A. Soybean Harvesting Using Current Dedicated Headers and Adapters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;659:012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012014>
12. Lachuga Yu.F., Bur'yanov A.I., Pakhomov V.I., Chervyakov I.V. Adaptation of Threshing Devices to Physical and Mechanical Characteristics of Harvested Crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(2):198–201. <https://doi.org/10.3103/S1068367420020111>
13. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. The Results of the Combine Design Adaptation to Work with a Stripper Header. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):190–206. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.190-206>
14. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V., Alakin V.M., Stanovov S.N. [Study of the Parameters of a Combed Grain Heap]. *Technology in Agriculture*. 2013;(1):7–9. (In Russ.) EDN: **TZNNGD**
15. Dyemyentyev A.V., Skorik V.I., Pastukhov B.K. [Inclined Chamber of a Combine Harvester]. Patent 1,687,078 USSR. 1991 October 30. (In Russ.) Available at: <https://patents.su/4-1687078-naklonnaya-kamera-zernouborochnogo-kombajina.html> (accessed 04.04.2024).
16. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Grain Heap Separation at the Grates of a Combine Feederhouse. *Agricultural Engineering*. 2023;25(3):35–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-35-40>
17. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V., Sinyaya N.V., Chaplygin M.E., Fedina T.O. Combing the Standing Crops with Preliminary Separation of Loose Grains. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(1):73–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>
18. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. [Inclined Chamber of a Combine Harvester]. Patent 2,577,892 Russian Federation. 2016 March 20. (In Russ.) Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/49/47/cd/d5155d2f471138/RU2577892C1.pdf> (accessed 04.04.2024).
19. Baran I.A., Popov V.B. On the Issue of Increasing the Efficiency of the Cleaning System of a Self-Propelled Combine Harvester. *Vestnik GGTU im. P.O.Suhogo*. 2023;1:20–30. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WLRLVW**
20. Lovchikov A.P., Kulagin S.N. Justification for Improving the Wind-Sieve Cleaning of a Combine Harvester. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2023;1(99):185–189. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-99-1-185-188>
21. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. [A Device for Threshing Plants on the Root]. Patent 2,566,017 Russian Federation. 2015 October 20. (In Russ.)
22. Ryadnov A.I. [A Device for Threshing Plants on the Root]. Patent 2,756,120 Russian Federation. 2021 September 28. (In Russ.)
23. Zhالنin E.V. The Main Objectives of the Introduction of Combing Headers “Ozone”. *Selskiy Mechanizator*. 2018;5:10–11. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **XWCSEH**
24. Savin V.Yu., Gorbachov I.V. Grain Cleaning Devices. *Selskiy Mechanizator*. 2019;3:8–10. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **SBEUZZ**
25. Mukha V.S. A New Results in the Analysis of the Multidimensional Data: Multidimensional-Matrix Polynomial Regression Analysis. *Doklady BGUIR*. 2019;3(121):57–64. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **YVGART**
26. Tashkinov Yu.A. Prediction of the Educational Results of Students of the Civil-Engineering Academy Using Regression Analysis in MS Excel. *Civil Defence Academy Journal*. 2020;1(21):90–97. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **ZYOBCW**
27. Kravchenko K.I., Mineeva T.A. [The Use of a Linear Correlation Coefficient to Determine the Nature of the Relationship Between Variables]. *Trends in the Development of Science and Education*. 2022;82(2):26–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2022-41>
28. Mansurova A.S. Comparative Analysis of Methods Verification Hypothesis about the Absence of a Trend in the Time Series. *Actual Problems of the Economy of Modern Russia*. 2016;3:516–522. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WDCDPJ**
29. Polshakova N.V., Alexandrova E.V., Volobueva T.A. Automation of Experimental Data Processing in Agronomic Research. *Bulletin of Agrarian Science*. 2022;4(97):131–139. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.4.129>



30. Anisimova G.D., Evseeva S.I., Myshlyavtseva M.D. [Information Technologies in Teaching Mathematical Statistics]. *Actual Problems of Teaching Mathematics at a Technical University*. 2018;6:15–20. (In Russ.) EDN: YOOOUT

Об авторах:

Савин Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры тепловых двигателей и гидромашин Калужского филиала Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (248000, Российская Федерация, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, Researcher ID: D-4378-2019, savin.study@yandex.ru

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

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

Заявленный вклад авторов:

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

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

В. В. Никитин – литературный и патентный анализ, доработка текста, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 08.04.2024; поступила после рецензирования 07.06.2024; принята к публикации 13.06.2024

About the authors:

Vladimir Yu. Savin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Chair of Heat Engines and Hydromachines, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (2 Bazhenova St., Kaluga 248000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, ResearcherID: D-4378-2019, savin.study@yandex.ru

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

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

Authors contribution:

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

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

V. V. Nikitin – literary and patent analysis, revision of the text, formation of general conclusions, final revision of the article.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 08.04.2024; revised 07.06.2024; accepted 13.06.2024



Исследование процесса подачи семян пропашных культур вакуумным аппаратом точного высева

А. Ю. Несмиян¹✉, К. П. Дубина¹, А. Ф. Бутенко¹,
А. П. Жигайлова¹, С. А. Войнаш², А. А. Ореховская²

¹ Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ

(г. Зерноград, Российская Федерация)

² Казанский федеральный университет
(г. Казань, Российская Федерация)

✉ nesmian.andrei@yandex.ru

Аннотация

Введение. Производительность сеялок точного высева зависит от многих факторов, в том числе и от функциональных возможностей их дозирующих систем, модернизация которых возможна только на основе достоверных закономерностей, позволяющих прогнозировать показатели поштучной подачи семян в борозду.

Цель исследования. Анализ влияния диаметра присасывающих отверстий аппарата точного высева и создаваемого в них разрежения на характеристики подачи семян основных пропашных культур.

Материалы и методы. Результаты исследования получены на основании серии экспериментов по высеву семян кукурузы и подсолнечника аппаратом сеялки МС-8, принцип действия которого можно считать типовым для вакуумных посевных машин.

Результаты исследования. Получены эмпирические зависимости частоты нулевых и групповых подач семян таких пропашных культур, как кукуруза и подсолнечник от площади присасывающих отверстий и величины разрежения в вакуумной камере.

Обсуждение и заключение. Полученные количественные оценки носят частный характер и могут отличаться для семян с другими технологическими свойствами даже одной культуры. Обобщающими являются данные о том, что частота формирования пропусков семян пропорциональна величине силы присасывания в рабочей плоскости дозирующего элемента, независимо от его площади. В то же время вероятность образования двойных подач зависит от площади дозирующих отверстий – при постоянной силе присасывания уменьшение их диаметра приводит к уменьшению частоты двойных подач. Полученные данные позволяют рассматривать совместное варьирование величины разрежения в вакуумной камере и диаметра присасывающих отверстий как эффективные инструменты повышения качества подачи семян.

Ключевые слова: семена кукурузы и подсолнечника, вакуумная пропашная сеялка, аппарат точного высева, высевной диск, присасывающие отверстия, разрежение, сила присасывания, подача семян

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Несмиян А. Ю., Дубина К. П., Бутенко А. Ф., Жигайлова А. П., Войнаш С. А., Ореховская А. А., 2024



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

Для цитирования: Исследование процесса подачи семян пропашных культур вакуумным аппаратом точного высева / А. Ю. Несмиян [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 388–406. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.388-406>

The Study of the Process of Supplying Seeds of Row Crops Using a Vacuum Seed-Placing Unit

A. Yu. Nesmiyan^a✉, K. P. Dubina¹, A. F. Butenko¹,
A. P. Zhigailova¹, S. A. Voinash², A. A. Orekhovskaya²

^a Azov-Black Sea Engineering Institute,
Donskoy State Agrarian University
(Zernograd, Russian Federation)

^b Kazan Federal University
(Kazan, Russian Federation)

✉ nesmiyan.andrei@yandex.ru

Abstract

Introduction. The performance of precision seeders depends on many factors, including the functionality of their dosing systems, the modernization of which is possible only on the basis of patterns, which allows forecasting the indicators of single seed placing into a furrow.

Aim of the Study. The study is aimed at analyzing the influence of the diameter of the suction holes of seed-placing units and the rarefaction created in them on the characteristics of placing seeds of the main row crops.

Materials and Methods. The results of the study were obtained based on a series of experiments on sowing corn and sunflower seeds using an MS-8 seeder, the operation principle of which can be considered typical for vacuum seed-placing units.

Results. There have been obtained empirical dependences of the particular features of zero and group placing seeds of such row crops as corn and sunflower on the area of the suction holes and the rarefaction in the vacuum chamber.

Discussion and Conclusion. The quantitative estimates obtained may differ for seeds of the same crop, but having different technological properties. The general factor is that the frequency of missing seeds is proportional to the suction force magnitude in the working plane of the metering element, regardless of its area. At the same time, the probability of double seed placing depends on the area of the metering ports with a constant suction force, a decrease in their diameter leads to a decrease in the frequency of double seed placing. The data obtained allow considering joint variations in the magnitude of the rarefaction in the vacuum chamber and the diameter of the suction holes as effective tools for improving the seed placing quality.

Keywords: corn and sunflower seeds, vacuum row crop seeder, seed-placing unit, seed disc, suction holes, rarefaction, suction force, seed placing

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

For citation: Nesmiyan A. Yu., Dubina K. P., Butenko A. F., Zhigailova A. P., Voinash S. A., Orekhovskaya A. A. The Study of the Process of Supplying Seeds of Row Crops Using a Vacuum Seed-Placing Unit. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):388–406. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.388-406>

Введение. В современной России парк посевных машин¹ [1–3] марочно превосходит парк сеялок, используемых в советский и постсоветский периоды, однако существенно уступает ему количественно. Это привело к возрастанию нагрузки на одну сеялку, в том числе и при посеве пропашных культур. Практически повсеместно годовая загрузка посевных машин существенно превосходит рекомендуемые значения² [4–6], а в отдельных хозяйствах при посеве пропашных культур загрузка доходит до 300–500 га на машину (при примерном нормативном значении около 200 га). В свою очередь, это приводит к необходимости увеличения скоростей движения посевных агрегатов³, к необходимости повышения их функциональных возможностей, дальнейшему конструктивному совершенствованию [7–9], поскольку сроки посева при благоприятном соотношении температуры почвы и её влажности – важный фактор повышения эффективности технологий [10–12].

Обзор литературы. Производительность сеялок точного высева зависит от многих факторов, один из основных – функциональные возможности дозирующих систем (высевающих аппаратов), модификация или модернизация которых возможна только на основе достоверно установленных закономерностей, позволяющих проследить зависимость качественных показателей функционирования высевающих аппаратов от их параметров и режимов работы.

Сотрудниками научных или образовательных организаций и специалистами предприятий сельхозмашиностроения ведется постоянная работа, направленная на совершенствование конструкции высевающих аппаратов: широко применяются аппараты с закрытой подвижной вакуумной камерой [13; 14], изменяются конструкции сбрасывателей и (или) ворошителев семян [15–17]; внедряются оригинальные дозирующие элементы [18–20], разрабатываются аппараты для высева семян с экзотическими физико-механическими свойствами [21–23] и аппараты, работающие на новых принципах дозирования⁴ [24–26], расширяется применение в конструкции дозирующих систем посевных машин элементов цифровизации и автоматизации [27–29] и т. д.

В отечественном агропроме наиболее широкое применение получили пропашные сеялки с вакуумными системами дозирования, поэтому целью представленного исследования является анализ влияния диаметра присасывающих отверстий аппаратов точного высева и создаваемого в них разрежения на характеристики

¹ Оптимизация вакуумных высевающих аппаратов пропашных сеялок : моногр. / А. Ю. Несмиян [и др.]. Зерноград, 2013. 176 с.; Chernyshov A. V., Soldatov Yu. I. Experimental Research of Soybean Seeding Quality by the Sowing Section of the TSM-4150 Seeder // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (на иностранных языках). Воронеж, 2022. С. 78–82.

² Нормативная годовая загрузка тракторов и сельскохозяйственных машин (справочное). URL: <https://studfile.net/preview/2905742/page:58> (дата обращения: 05.07.2023).

³ Несмиян А. Ю. Совершенствование технологического процесса высева семян тыквы аппаратом пневматической сеялки : дис. ... канд. техн. наук. Зерноград, 2003. 139 с.

⁴ QDAF, Varieties and Planting of Maize // Department of Agriculture, Fisheries and Forestry Queensland. 2016. URL: <https://www.daf.qld.gov.au/business-priorities/agriculture/plants/crops-pastures/broadacre-field-crops/varieties-planting-maize> (дата обращения: 17.09.2021); World of Corn. U.S Production per State from USDA Data // URL: <http://www.worldofcorn.com/#us-corn-production-by-state> (дата обращения: 17.09.2021).



подачи семян таких пропашных культур, как кукуруза и подсолнечник, массово возделываемых не только в России, но и во всем мире⁵ [30–32].

При работе большинства аппаратов точного высева (рис.1) можно выделить ряд характерных этапов [2]:

1. Истечение семян из бункера через питающую горловину в семенную камеру;
2. Захват одного семени или их группы дозирующими элементами, в подавляющем большинстве случаев круглыми присасывающими отверстиями, выполненными в высевающем диске, и последующий вынос из семенной камеры;
3. Удаление «лишних» семян (всех, кроме основных), присосавшихся к дозирующим элементам;
4. Транспортировка оставшихся у дозирующих элементов семян при вращении высевающего диска в зону сброса;
5. Сброс семян в сошниковое пространство (в борозду).

Все этапы (за исключением четвертого) достаточно важны и ощутимо влияют на распределение семян пропашных культур в рядах посева, тем не менее многие исследователи концентрируются именно на втором этапе (захват и вынос семян) как определяющем условия реализации последующих этапов.

В вакуумных высевающих аппаратах (ВВА) этот этап (процесс) реализуется за счет совместного действия сил присасывания и трения высевающего диска о захваченное семя у зоны присасывающих отверстий [33–35].

Интерпретация данных, полученных в предыдущих исследованиях [33–35], однозначно указывает на то, что показатели подачи семян ВВА зависят от соотношения (λ) группы сил, способствующих захвату семян (условно – полезных сил $P_{\text{пол}}$), и группы сил R , противодействующих этому процессу. В упрощенном виде:

$$\lambda = \frac{P_{\text{пол}}}{R} \text{ или } \lambda = \frac{\mu(0,25k_{\text{пр}}d^2H + \gamma \cdot h \cdot A \cdot g \cdot \text{tg } \beta)}{R},$$

где $P_{\text{пол}}$ – величина равнодействующей условно полезных сил, Н; R – величина равнодействующей сил, препятствующих выносу семени из общего массива, Н; μ – коэффициент, характеризующий фрикционные свойства взаимодействующей пары «семя – кромка присасывающего отверстия»; $k_{\text{пр}}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий «потери» воздуха на просасывание в зазоры между семенем и кромкой присасывающего отверстия; d и H – соответственно диаметр (м) присасывающего отверстия и величина создаваемого в нем разрежения, Па; γ – насыпная плотность слоя семян, кг/м³; h – высота слоя семян в семенной камере над захватываемым семенем, м; A – площадь Миделева сечения семени, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – угол укладки семян в семенной камере, град.

Если коэффициент λ меньше единицы ($\lambda < 1$), то семя захватываться не будет. Соответственно, вероятность пропуска, в предположении нормального распределения величин [39] варьирования «полезной» и «вредной» сил, может быть определена исходя из зависимости:

⁵ Millerovoselmash. MS-8 Block-Type Seeder (Basic Model). Operation Manual (for an Operator). Millerovo. 2011. URL: https://www.rosagromir.ru/upload/iblock/fb0/MS_8_manual.pdf (дата обращения: 25.02.2024).

$$P_0 = \int_{\lambda_{\min}}^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}} d\lambda,$$

здесь $\lambda_{\min} = \frac{P_{\text{пол min}}}{R_{\text{max}}}$, $\lambda_{\text{cp}} = 0,5(\varepsilon_{\text{max}} + \varepsilon_{\text{min}})$, $\sigma = \frac{1}{6}(\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\min})$, $\lambda_{\text{max}} = \frac{P_{\text{пол max}}}{R_{\min}}$, где $\lambda_{\min}$, λ_{max} и λ_{cp} – соответственно минимальное, максимальное и среднее расчетные значения соотношения условно «полезных» сил и сил сопротивления (зависят от варьирования физико-механических свойств высеваемых семян, отдельных параметров и режимов работы ВВА); σ – расчетное значение среднеквадратического отклонения величины ε .

Если $\lambda \geq 1$, то возможны два характерных исхода – присасывающим отверстием будет захвачено одно семя или группа семян (два и более). Первый обеспечивается в том случае, если коэффициент λ незначительно превышает единицу или равен ей, второй – при $\lambda \gg 1$ [38; 39]. При этом размерные характеристики семян, их насыпная плотность, угол передачи силы давления вышележащих семян и многие другие факторы при работе ВВА можно считать неуправляемыми, а часть нефиксируемыми. По большому счету можно утверждать, что на практике обеспечение примерно необходимого соотношения сил λ достигается за счет подбора значений диаметра круглых дозирующих элементов (d , мм) и разрежения (H , кПа) в них. На основе сочетания экспериментальных исследований и практического опыта были подобраны рациональные величины двух этих факторов. Так, например, при высевах семян кукурузы рекомендуются величины $d_{\text{кук}} = 4 - 5$ мм и $H_{\text{кук}} = 4,0 - 4,5$ кПа, а при высевах подсолнечника – $d_{\text{подс}} = 2,5 - 3$ мм и $H_{\text{подс}} = 4,0 - 4,5$ кПа. Такие значения исследуемых факторов обеспечивают практически гарантированный захват семян, но при этом приводят к формированию большого количества групповых подач, наличие которых также отрицательно сказывается на дальнейшем развитии проросших из семян растений, а значит и на урожайности (правда в менее выраженной степени, чем наличие «пропусков»). Для устранения избыточных семян от присасывающих отверстий в конструкции практически всех современных ВВА применяют сбрасыватели «лишних» семян (далее – сбрасыватель), как правило со ступенчатой или пилообразной рабочей поверхностью [2; 15; 35].

Сбрасыватель – довольно простое конструктивно, но сложное в эксплуатации устройство, рациональное положение которого устанавливается «на глаз» и на режимах, не соответствующих рабочим, что делает функционирование высевающего аппарата в определенном диапазоне слабо предсказуемым [2; 15; 35]. Отдельные опыты показали, что «облегчить» работу сбрасывателя можно за счет снижения количества групповых подач семян ещё на этапе их захвата присасывающими отверстиями. Гипотетически можно добиться почти полного отсутствия групповых подач за счет уменьшения площади круглых дозирующих элементов, минимального уровня пропусков и создания необходимой величины разрежения. Однако подбор рационального сочетания диаметра присасывающих отверстий и разрежения возможен только на основе знания зависимостей влияния этих факторов на формирование подачи семян.

Материалы и методы. Исследование проводилось экспериментальным путем при высеве ВВА сеялки МС-8 [34], получившей широкое распространение на юге Российской Федерации, семян кукурузы и подсолнечника (рис. 1). Рассматриваемый ВВА содержит оригинальный штампо-сварной корпус 1, в котором посредством подшипникового узла установлен приводной вал 2, на котором фиксируются высевной диск 3 и ворошитель семян 4. Для исключения трения высевного диска 3 о корпус 1 между ними располагается полиамидная прокладка 5. С другой стороны к высевному диску 3 примыкает крышка 6 с семенной камерой 7, также выполненной из полиамида. В крышке 6 размещается сбрасыватель «лишних» семян 8 с регулировочным механизмом 9. Крышка 6 фиксируется у корпуса 1, в котором изготовлена вакуумная камера 10, связанная с пневмосистемой сеялки разъемными соединениями 11.



Р и с. 1. Исследуемый вакуумный высевной аппарат
F i g. 1. Vacuum seed-placing unit under study

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

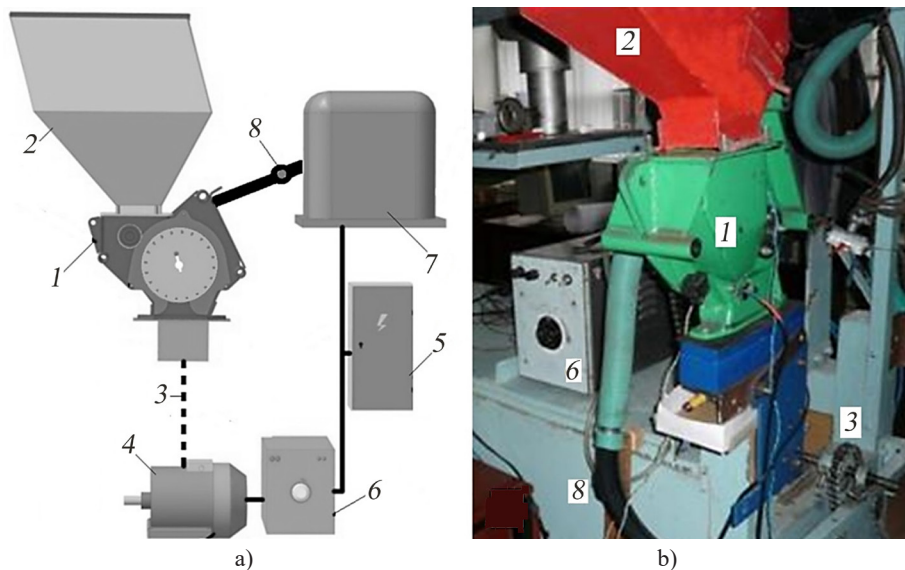
Такой высевной аппарат отличается оригинальной штампо-сварной конструкцией, однако функционально его можно считать классическим, поскольку принцип его действия характерен для большинства ВВА, используемых как в нашей стране, так и в европейских странах.

Исследуемый высевной аппарат не эксплуатировался в полевых условиях, наработка в лабораторных условиях составляет около 69 часов, что позволяет говорить о низкой степени изношенности его основных узлов.

Исследование проводилось в лабораторных условиях [34], при этом высевной аппарат 1 с бункером 2 (рис. 2) закреплялся на стационарной станине.

Привод ведущего вала осуществлялся через трансмиссию 3 от регулируемого электродвигателя 4. Наличие автотрансформатора 6 позволяло устанавливать необходимую частоту вращения высевного диска. Разрежение в ВВА 1 создавалось пневмоустановкой (экстаустером) 7, а его величина регулировалась положением дроссельной заслонки 8.

Некоторые размерные и массовые характеристики посевного материала, используемого в исследовании, представлены в таблице 1, в которой приняты следующие обозначения: $\bar{X}$ – среднее значение параметра; σ_x – среднеквадратическое отклонение параметра; a_x – ошибка наблюдений (абсолютное значение).



Р и с. 2. Установка для исследования аппаратов точного высева:

а) схема установки; б) внешний вид стенда; 1 – ВВА; 2 – бункер; 3 – цепные передачи; 4 – двигатель постоянного тока; 5 – источник электроэнергии; 6 – автотрансформатор (ЛАТР); 7 – генератор разрежения эжекторного типа; 8 – дроссель

F i g. 2. Installation for studying precision seeding devices:

а) installation diagram; б) appearance of the stand; 1 – VVA; 2 – bunker; 3 – chain drives; 4 – DC motor; 5 – source of electricity; 6 – autotransformer (LATR); 7 – ejector-type vacuum generator; 8 – throttle

Источник: составлено авторами статьи по результатам исследования [34].

Source: compiled by the authors based on the results of the study [34].

Т а б л и ц а 1

Table 1

Некоторые размерно-массовые характеристики посевного материала

Some size and mass characteristics of seed material

Гибрид / Сорт Hybrid / Variety	Показатель / Index	$\bar{X}$	σ_x	a_x
Подсолнечник Пионер / Sunflower Pioneer	Длина, мм / Length, mm	10,0	0,7	0,05
	Ширина, мм / Width, mm	5,6	0,5	0,03
	Толщин, мм / Thickness, mm	3,3	0,5	0,03
	Масса 1 000 семян, г / Mass of 1 000 seeds, g	58,9	–	–
Кукуруза Зерноградский 282 MB / Corn Zernogradskiy 282 MV	Длина, мм / Length, mm	11,6	0,7	0,03
	Ширина, мм / Width, mm	8,8	0,8	0,03
	Толщина, мм / Thickness, mm	5,6	0,7	0,03
	Масса 1 000 семян, г / Mass of 1 000 seeds, g	253,6	–	–

Условия проведения эксперимента представлены в таблице 2. В целом при высеве каждой культуры было проведено 15 опытов, каждый из них в трехкратной повторности. В каждой повторности анализировалась подача семян тремястами присасывающими отверстиями. Частота вращения высевающего диска составляла около 0,7 об/сек.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Условия реализации эксперимента
Conditions for the experiment

Подсолнечник / Sunflower						Кукуруза / Corn					
d , мм / mm	Разрежение, H , кПа / Vacuum, H , kPa					d , мм / mm	Разрежение, H , кПа / Vacuum, H , kPa				
Варианты / Variants	1	2	3	4	5	Варианты / Variants	1	2	3	4	5
2,0						2,5					
2,3	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	3,0	5,0	6,5	8,0	9,5	11,0
2,6						3,5					

При проведении эксперимента сбрасыватель «лишних» семян демонтировался из конструкции аппарата, что позволило оценить характеристики реализации этапа «захват и вынос семян».

Результаты исследования. На рисунке 3 представлены результаты экспериментального исследования влияния рассматриваемых факторов на характеристики подачи семян подсолнечника.

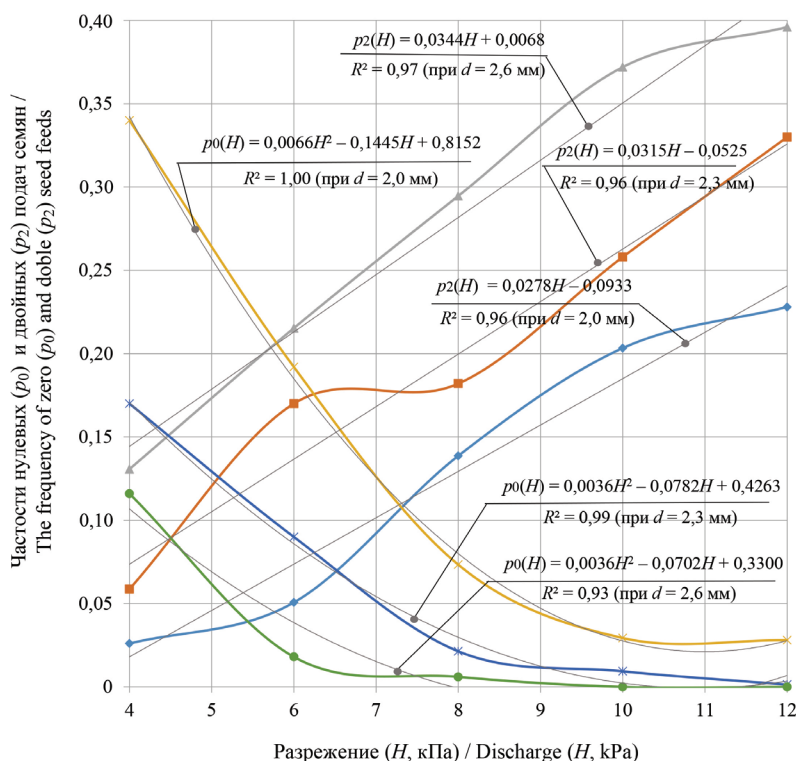
Анализ данных рисунка позволяет сделать вывод, что зависимости изменения частоты нулевых подач от разрежения в вакуумной камере аппарата сеялки МС-8 носят квадратичный характер, а зависимости изменения частоты двойных подач с высокой точностью (более 96 %) могут быть описаны линейными уравнениями.

Суммарное решение регрессионных уравнений, представленных на рисунке 4, позволило выявить обобщенные зависимости частот нулевых (1) и двойных (2) подач семян от двух факторов, определяющих силу присасывания, – диаметра присасывающих отверстий (d , мм) и разрежения (H , кПа):

$$p_{0\text{подс}} = (0,532H^2 - 11,292H + 60,586) / d^6, \quad (1)$$

$$p_{2\text{подс}} = 0,01 (0,24 \cdot d^3 \cdot H - 1,51 d) 10^{-2}. \quad (2)$$

На рисунке 4 представлены соответствующие зависимости, полученные экспериментальным ($p_{0э}$ и $p_{2э}$) и расчетным ($p_{0р}$ и $p_{2р}$) путями, которые позволяют предположить достаточно высокую их сходимость.

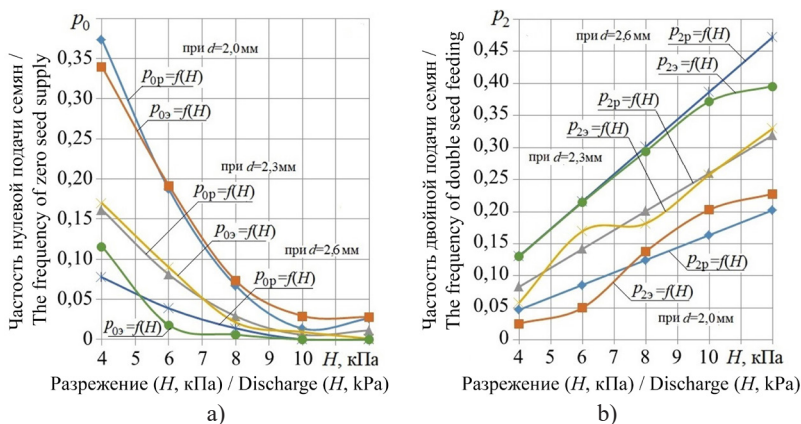


Р и с. 3. Характеристики работы ВВА МС-8 при подаче семян подсолнечника

F i g. 3. Characteristics of operation of VVA MS-8 when placing sunflower seeds

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи по результатам лабораторных экспериментов.

Source: in what follows the diagrams compiled by the authors based on the results of the laboratory tests.

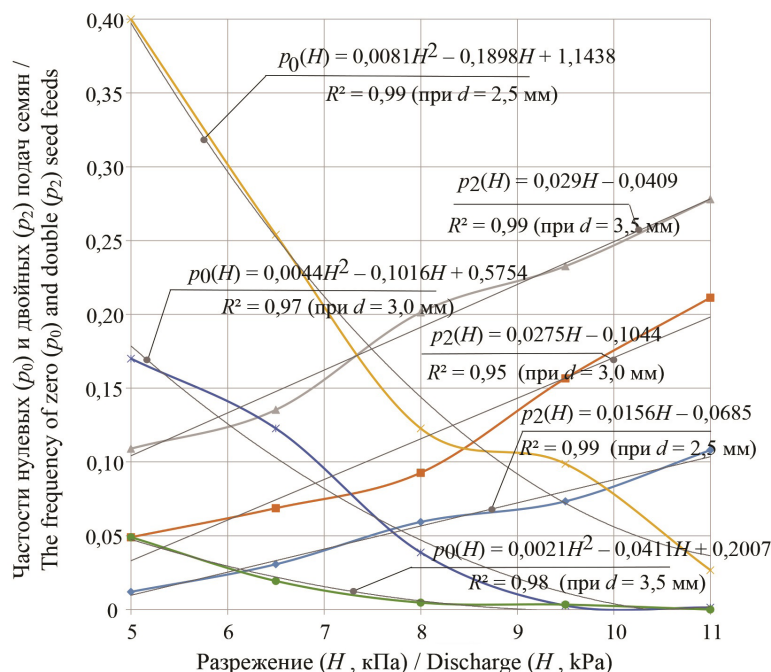


Р и с. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости частоты образования нулевых (а) и двойных (б) подач семян подсолнечника от разрежения в вакуумной камере при различных значениях диаметров присасывающих отверстий

F i g. 4. Calculated and experimental frequency dependences formation of zero (a) and double (b) placing of sunflower seeds from the rarefaction in the vacuum chamber at various values of suction holes diameters

Проверка сходимости полученных при высеве подсолнечника результатов, проведенная с использованием критерия Пирсона, показала, что данные, сформированные расчетным путем (с использованием выражений (1–2)), соответствуют экспериментальным с достоверностью 93–94 %. При расчетах частоту образования нулевых и двойных подач выражали в процентах. Полученные значения достоверности одновременно говорят и о возможности практического применения зависимостей (1–2), и о необходимости дальнейших экспериментальных исследований, направленных на снижение влияния на получаемый результат погрешности измерений и случайных факторов.

Результаты экспериментального исследования влияния рассматриваемых факторов на качество дозирования семян кукурузы даны на рисунке 5.



Р и с. 5. Характеристики работы ВВА МС-8 при подаче семян подсолнечника

Fig. 5. Characteristics of operation of VVA MS-8 when feeding sunflower seeds

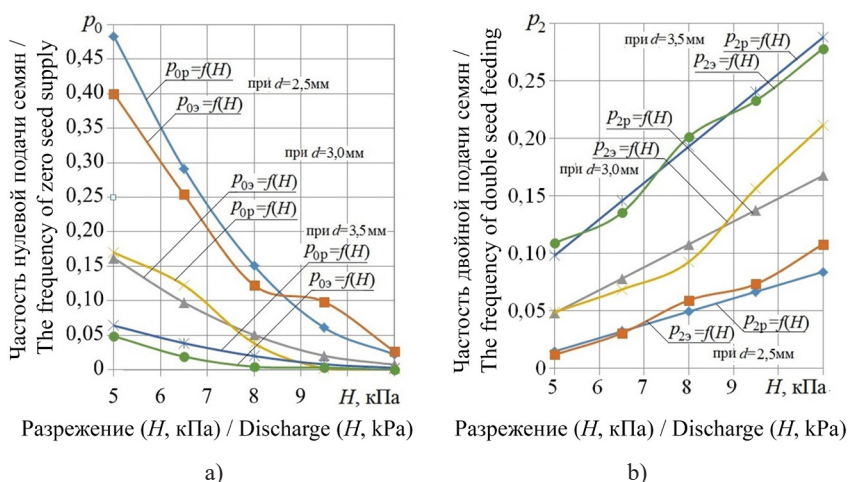
Из представленных данных видно, что при высеве кукурузы зависимости изменения частоты нулевых подач от разрежения в вакуумной камере аппарата сеялки МС-8, так же как и при высеве подсолнечника, носят квадратичный характер, а зависимости изменения частоты двойных подач – линейный.

Суммарное решение полученных при аппроксимации данных (рис. 5) регрессионных уравнений позволило выявить соответствующие обобщенные зависимости частот нулевых (3) и двойных (4) подач семян кукурузы:

$$p_{0\text{кук}} = (2,76H^2 - 63,046H + 364,038) / d^6, \quad (3)$$

$$P_{2\text{кук}} = (0,074 d^3 H - 1,7d) 10^{-2}. \quad (4)$$

На рисунке 6 представлены зависимости, характеризующие влияние разрежения в вакуумной камере на подачу семян кукурузы при различных размерах присасывающих отверстий, полученные экспериментальным ($p_{0э}$ и $p_{2э}$) и расчетным ($p_{0р}$ и $p_{2р}$) путями, позволяющие предполагать достаточно высокую сходимость используемых методов. Проверка, проведенная с использованием критерия Пирсона, показала, что расчетный метод позволяет прогнозировать количество групповых подач семян кукурузы классическим высевальным диском (без дополнительных периферийных ворошителей) с достоверностью близкой к единице (0,99). Достоверность сходимости кривых, представленных на рисунке 6а, составила около 80 %. Можно сделать вывод, что выражение (3), адекватно описывающее качественные характеристики частоты образования пропусков при дозировании семян кукурузы, нуждается в количественном уточнении на основе серии дополнительных экспериментов.



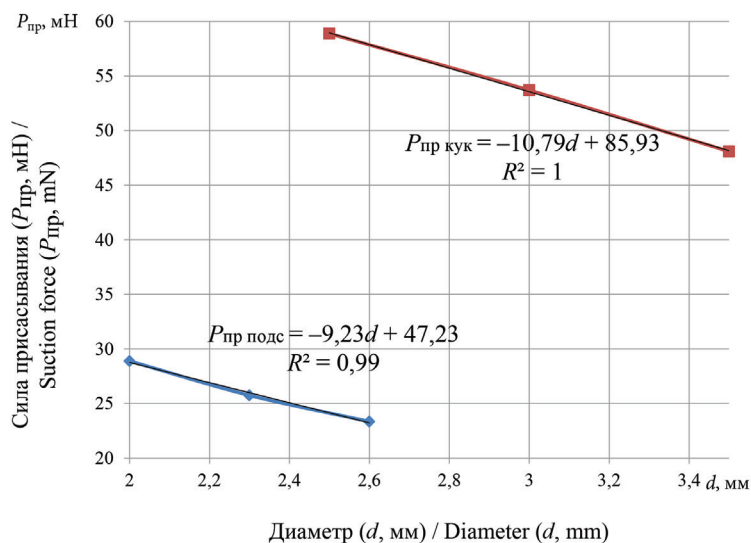
Р и с. 6. Расчетные и экспериментальные зависимости частоты образования нулевых (а) и двойных (б) подач семян кукурузы от разрежения в вакуумной камере при различных значениях диаметров присасывающих отверстий

F i g. 6. Calculated and experimental frequency dependences formation of zero (a) and double (b) feeds of corn seeds from the pressure drop in the vacuum chamber at various values of suction holes diameters

Совместный анализ данных рисунков 3–6 и зависимостей (1–4) позволяет предположить, что вероятность образования нулевых подач пропорциональна величине силы присасывания. Так, при высеве подсолнечника примерно одинаковая частота нулевых подач (около 0,05 %) обеспечивалась при примерном значении присасывающей силы $P_{пр} = 30 \pm 2$ мН, при высеве кукурузы независимо от диаметра присасывающих отверстий – $P_{пр} = 52 \pm 4$ мН.

Вероятность образования двойных подач определяется не только значением силы присасывания. В опытах, при высеве обеих рассматриваемых культур,

при уменьшении размеров круглых дозирующих элементов для образования двойных подач (анализировались уровни частоты двойных подач $p_2 \approx 0,15$ для подсолнечника и $p_2 \approx 0,10$ для кукурузы) требовалось большее значение силы присасывания (рис. 7)



Р и с. 7. Зависимости влияния диаметра присасывающих отверстий на величину «необходимой» силы присасывания при высеве подсолнечника (при $p_2 \approx 0,10$) и кукурузы (при $p_2 \approx 0,15$)

Fig. 7. Dependencies of the influence of diameter suction holes on the magnitude of “necessary” suction force when sowing sunflower (at $p_2 \approx 0,10$) and corn (at $p_2 \approx 0,15$)

Причем из данных рисунка 7 видно, что интенсивность изменения «необходимой» силы присасывания в обоих случаях составляет примерно около 10 мН/мм, что позволяет охарактеризовать изменение диаметра присасывающих отверстий как достаточно перспективный способ борьбы с двойными подачами семян.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование позволило установить, что зависимости изменения частоты нулевых подач от разрежения в вакуумной камере аппарата с гладким высевающим диском (типа МС-8) носят квадратичный характер, а зависимости изменения частоты двойных подач с высокой точностью (более 96 %) могут быть описаны линейными уравнениями. При этом были получены частные зависимости частот нулевых и двойных подач семян для подсолнечника и кукурузы от двух факторов, определяющих силу присасывания – диаметра присасывающих отверстий (d , мм) и разрежения (H , кПа):

$$p_{0\text{подс}} = (0,53H^2 - 11,29H + 60,57) / d^6;$$

$$p_{2\text{подс}} = 0,01 (0,24d^3H - 1,51d) 10^{-2};$$

$$p_{0\text{кук}} = (2,76H^2 - 63,05H + 364,04) / d^6;$$

$$p_{2\text{кук}} = (0,074d^3H - 1,7d) 10^{-2}.$$

Проверка сходимости полученных результатов, проведенная с использованием критерия Пирсона, показала, что данные, сформированные расчетным путем, соответствуют экспериментальным с достоверностью 80–99 %. Совместный анализ экспериментальных и расчетных зависимостей позволяет предположить, что вероятность образования нулевых подач пропорциональна величине силы присасывания. Так, при высеве подсолнечника примерно одинаковая частота нулевых подач (около 0,05 %) обеспечивалась при примерном значении присасывающей силы 30 ± 2 мН, а при высеве кукурузы независимо от диаметра присасывающих отверстий – 52 ± 4 мН. В то же время вероятность образования двойных подач не определяется только значением силы присасывания, в опытах при уменьшении размеров присасывающих отверстий для образования групповых подач «требовалось» увеличение силы присасывания. Причем интенсивность изменения «необходимой» силы присасывания в обоих случаях составляет примерно около 10 мН/мм, что позволяет охарактеризовать изменение диаметра присасывающих отверстий как достаточно перспективный способ борьбы с двойными подачами семян. Полученные количественные оценки носят, несомненно, частный характер. Они характерны для семян конкретных сортов (гибридов) культур, использованных в эксперименте, и для семян с другими физико-механическими свойствами будут, скорее всего, другими.

Тем не менее проведенное исследование позволяет сделать ряд обобщающих выводов, характеризующих работу аппарата с гладким вертикально расположенным высевающим диском: зависимости изменения частоты нулевых подач от разрежения в вакуумной камере носят квадратичный характер; зависимости изменения частоты двойных подач от разрежения в вакуумной камере носят линейный характер; вероятность образования нулевых подач пропорциональна величине силы присасывания, формируемой в рабочей плоскости дозирующего элемента независимо от его площади; вероятность образования двойных подач зависит от силы присасывания, но при меньших размерах присасывающих отверстий групповые подачи могут формироваться только при росте значений силы присасывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation of Technical Characteristics and Agrotechnical Performance Indicators of Seeders of Various Assembling / A. Nesmian [et al.] // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. 2022. Vol. 246. P. 88–101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_10
2. Анализ конструкций пропашных сеялок / В. И. Хижняк [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 4 (52). С. 42–52. URL: <https://clck.ru/3CgXo8> (дата обращения: 25.02.2024).
3. Основные направления совершенствования сеялок точного высева пропашных культур / А. А. Завражнов [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2022. № 1 (128). С. 7–21. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-1-7-21>
4. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Распределение семян подсолнечника в рядок в зависимости от скоростных режимов работы пневматического высевающего аппарата // Техника и оборудование для села. 2021. № 8 (290). С. 14–17. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-8-14-17>
5. Kryuchin N. P., Gorbachev A. P. Improvement of the Technological Process of Sowing Sunflower Seeds with a Pneumatic Seed Planter // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 845. Article no. 012136. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012136>



6. Операция посева – ключевой элемент создания технологий растениеводства шестого технологического уклада / П. В. Лаврухин [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 4 (56). С. 24–32. URL: <https://clck.ru/3Внепо> (дата обращения: 25.02.2024).
7. Результаты исследований агротехнических показателей селекционной сеялки «Деметра» / В. И. Пахомов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 1. С. 90–109. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.090-109>
8. Геометрия посева пропашных культур / А. А. Завражнов [и др.] // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 59–66. <https://doi.org/10.31857/S2500262722010100>.
9. Sunflower Crop and Climate Change: Vulnerability, Adaptation, and Mitigation Potential from Case-Studies in Europe / P. Debaeke [et al.] // OCL. 2017. Vol. 24, Issue 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
10. Potential of Corn Silage Production in Different Sowing Times in the Paraná Midwest Region / M. Neumann [et al.] // Applied Research & Agrotechnology. 2016. Vol. 9, Issue 1. P. 37–44. <https://doi.org/10.5935/PAET.V9.N1.04>
11. Markova N. V. Influence of Sowing Terms and Technological Features of Cultivation on the Formation of Yield and Seed Quality of Hybrids of Sunflower // Herald of Agrarian Science of Black Sea Region. Mykolayv. 2010. Issue 2 (53). P. 212–218. <https://doi.org/10.9790/2380-0909015964>
12. Optimization of Sowing Time for Grain Sorghum and Millet / A. V. Baranovsky [et al.] // Bioscience Research. 2020. Vol. 17, Issue 2. P. 1121–1128. URL: [https://www.isisn.org/BR17\(2\)2020/1121-1128-17\(2\)2020BR20-97.pdf](https://www.isisn.org/BR17(2)2020/1121-1128-17(2)2020BR20-97.pdf) (дата обращения: 25.02.2024).
13. Effects of Cropping Architect and Sowing Date on Forage Quantity and Quality of Corn (Zea Maize L.) as a Second Crop in Western Iran / A. Shirkhani [et al.] // Annals of Biological Research. 2012. Vol. 3, Issue 9. P. 4307–4312. URL: <https://clck.ru/3Bnfzw> (дата обращения: 25.02.2024).
14. Пневматический высевательный аппарат : патент 207950 A01C 7/04 Российская Федерация / А. А. Завражнов [и др.]. № 2021124211 ; заявл. 16.08.2021 ; опубл. 25.11.2021. URL: https://new.fips.ru/register-doc-view/fips_server?DB=RUPMAP&DocNumber=2021124211&TypeFile=html (дата обращения: 25.02.2024).
15. Должикова Н. Н., Должиков В. В. Качественный посев семян подсолнечника // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 2. С. 86–88. <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-42>
16. Дубина К. П. Оптимизация подачи семян кукурузы дозирующими элементами переменного сечения // Аграрный научный журнал. 2019. № 2. С. 86–91. <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i2pp86-91>
17. Design and Study of Seeding Devices for Small Selection Seeding Machines / V. Nemtinov [et al.] // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 126. Article no. 00008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600008>
18. Theoretical Studies of Movement of Loose Material in a Dosing Device / Yu. M. Isaev [et al.] // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Т. 9, № 5. С. 834–840. EDN: XPNHWH
19. Крючин Н. П., Котов Д. Н., Артамонова О. А. Теоретическое исследование процесса перемещения замоченных семян рабочими органами торсионно-штифтового высевательного аппарата // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 2 (82). С. 148–152. EDN: JIBNQA
20. Evaluation of the Efficiency of Row-Crop Seeders using Vacuum and Extrabaric Seed Metering Methods / Khizhnyak V. I. [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 659. Article no. 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
21. Разработка дозирующего модуля сеялки пунктирного высева СПВ-870 / В. И. Хижняк [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 2 (50). С. 27–33. EDN: NDTIQJ
22. Markvo I., Zubrilina E., Novikov V. Precise Seeding Planter Concept with Air Pumped Seedtube // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 126. Article no. 00054. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600054>
23. Теоретическое исследование процесса дозирования семян с использованием нагнетающего воздушного потока / В. И. Хижняк [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 4 (56). С. 46–54. URL: <https://clck.ru/3ChJQ3> (дата обращения: 25.02.2024).
24. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Обеспечение режимов работы высевательного аппарата специализированным оборудованием // Тракторы и сельхозмашины. 2021. Т. 88, № 4. С. 6–12. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-20214-6-12>

25. Киреев И. М., Коваль З. М., Зимин Ф. А. Новые метод и средство контроля качества работы пневматических высевальных аппаратов точного высева семян // Техника и оборудование для села. 2020. № 1 (271). С. 24–27. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-1-24-27>
26. Модернизация системы контроля высева семян на пропашных сеялках / А. И. Завражнов [и др.] // Сельский механизатор. 2021. № 7. С. 8–9. URL: <http://selmech.msk.ru/721.html> (дата обращения: 25.02.2024).
27. Попов А. Ю. Моделирование квадратно-гнездового посева // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 4. С. 524–549. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.524-549>
28. Maize Production Technologies in India / С. М. Parihar [et al.] // DMR Technical Bulletin. Directorate of Maize Research, Pusa Campus, New Delhi-110012. 2011. URL: <https://imr.icar.gov.in/wp-content/uploads/2020/03/Maize-production-technologies-03012017.pdf> (дата обращения: 25.02.2024)
29. Orjuela S., Pabon J., Fonseca M. Experimental Assessment of Emissions in Low Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends of Palm and Sunflower Oil // International Journal on Engineering Applications. 2021. Vol. 9, Issue 3. P. 128–136. URL: <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19810>
30. Corn (Zea Mais L.) Sowing Quality in the Province of Corrientes, Argentina / O. R. Pozzolo [et al.] // Rev. FCA UNCUI. 2020. Vol. 52, Issue 2. P. 111–123. URL: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCa/article/view/4042> (дата обращения: 25.02.2024).
31. Substantiation of Seed Disc Construction for Sowing Seeds / I. N. Krasnov [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2018. Vol. 9, Issue 3. P. 985–996. URL: <https://clck.ru/3CjFT9> (дата обращения: 25.02.2024).
32. Vacuum Planter's Seed Supply Quality as Affected by the Diameter of Suction Holes / A. Nesmiyan [et al.] // International Review of Automatic Control. 2022. Vol. 15, No. 2. С. 52–57. <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21493>
33. Probabilistic Modeling for Dynamic Processes / A. Nesmiyan [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. Article no. 05019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505019>
34. Стенд для испытания высевальных аппаратов сеялок точного высева : патент 2356210 С1 Российская Федерация / Лобачевский П. Я. [и др.]. № 2007143012/12 ; заявл. 20.11.2007 ; опубл. 27.05.2009. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2356210C1_20090527 (дата обращения: 25.02.2024).
35. Несмиян А. Ю., Дубина К. П., Жигайлова А. П. Влияние диаметра присасывающих отверстий аппарата точного высева на характеристики подачи семян кукурузы и подсолнечника // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 21–36. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.021-036>

REFERENCES

1. Nesmiyan A., Ivanov P., Kravchenko L., Arzhenovskiy A., Globin A. Evaluation of Technical Characteristics and Agrotechnical Performance Indicators of Seeders of Various Assembling. *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021"*. 2022;246:88–19. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_10
2. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Taranov V.A., Onishchenko E.A., Kaimakova A.S., Khronyuk V.B., et al. Analysis of the Construction of Massed Seed Drills. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2020;4(52):42–52. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3CgXo8> (accessed 25.02.2024).
3. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Shepelev V.Yu., Yakushev A.V. The Main Directions of Improvement of Precision Seeders of Row Crops. *Bulletin NGIEI*. 2022;1(128):7–21. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-1-7-21>
4. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. Distribution of Sunflower Seeds in a Row Depending on the Speed Modes of Operation of the Pneumatic Dropping Device. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021;8(290):14–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-8-14-17>
5. Kryuchin N.P., Gorbachev A.P. Improvement of the Technological Process of Sowing Sunflower Seeds with a Pneumatic Seed Planter. *IOP Conference Series: Earth and Environmental-mental Science*. 2021;845:012136. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012136>



6. Lavrukhin P.V., Kasakova A.S., Medvedko S.N., Ivanov P.A. Seeding Operation – a Key Element of Creation of Crop Technologies of the Sixth Technological Paradigm. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2021;4(56):24–32. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3Bnepo> (accessed 25.02.2024).
7. Pakhomov V.I., Kambulov S.I., Bozhko I.V., Parkhomenko G.G. The Results of Studying Agronomic Indicators of the Demetra Selection Seeder. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):90–109. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.090-109>
8. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Zemlyanoi A.A., Lantsev V.Yu., Akishin D.V., Ibraev A.S., et al. Geometry of Sowing Around Crops. *Russian Agricultural Science*. 2022;1:59–66. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2500262722010100>
9. Debaeke P., Casadebaig P., Flenet F., Langlade N. Sunflower Crop and Climate Change: Vulnerability, Adaptation, and Mitigation Potential from Case-Studies in Europe. *OCL*. 2017;24(1):1–15. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>
10. Neumann M., Horts E.H., Figueira D.N., Leão G.F.M., Cecchin D. Potential of Corn Silage Production in Different Sowing Times in the Paraná Midwest Region. *Applied Research & Agrotechnology*. 2016;9(1):37–44. <https://doi.org/10.5935/PAET.V9.N1.04>
11. Markova N.V. Influence of Sowing Terms and Technological Features of Cultivation on the Formation of Yield and Seed Quality of Hybrids of Sunflower. *Herald of Agrarian Science of Black Sea Region. Mykolayv*. 2010;2(53):212–218. <https://doi.org/10.9790/2380-0909015964>
12. Baranovsky A.V., Sadovoy A.S., Kapustin S.I., Kapustin A.S. Optimization of Sowing Time for Grain Sorghum and Millet. *Bioscience Research*. 2020;17(2):1121–1128. Available at: [https://www.isisn.org/BR17\(2\)2020/1121-1128-17\(2\)2020BR20-97.pdf](https://www.isisn.org/BR17(2)2020/1121-1128-17(2)2020BR20-97.pdf) (accessed 25.02.2024).
13. Shirkhani A., Ahmadi G.H., Mohammadi G., Ghitouli M. Effects of Cropping Architect and Sowing Date on Forage Quantity and Quality of Corn (*Zea Maize* L.) as a Second Crop in Western Iran. *Annals of Biological Research*. 2012;3(9):4307–4312. Available at: <https://clck.ru/3Bnfzw> (accessed 25.02.2024).
14. Zavrazhnov A.A., Zavrazhnov A.I., Brosalin V.G., Lantsev V.Yu., Zemlyanoi A.A. [Pneumatic Seeding Machine]. Patent 207950 A01C 7/04 Russian Federation. 2021 November 25. (In Russ.) Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPMAP&DocNumber=2021124211&TypeFile=html (accessed 25.02.2024).
15. Dolzhikova N.N., Dolzhikov V.V. [High-Quality Sowing of Sunflower Seeds. Trends in the Development of Science and Education]. 2020;2;86–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-42>
16. Dubina K.P. Optimization of Supply of Corn Seeds Accurate Accelerating Variable Section. *Agrarian Scientific Journal*. 2019;2:86–91. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i2pp86-91>
17. Nemtinov V., Kryuchin N.P., Kryuchin A.N., Nemtinova Y. Design and Study of Seeding Devices for Small Selection Seeding Machines. *E3S Web of Conferences*. 2019;126:00008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600008>
18. Isaev Yu.M., Kryuchin N.P., Semashkin N.M., Kryuchin A.N. Theoretical Studies of Movement of Loose Material in a Dosing Device. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(5):834–840. EDN: **XPNHWH**
19. Kryuchin N.P., Kotov D.N., Artamonova O.A. Theoretical Study of the Process of Soaked Seeds Transference by the Working Bodies of the Torsion-Pin Sowing Unit. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;2(82):148–152. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **JIBNQA**
20. Khizhnyak V.I., Shchirov V.V., Nesmiyan A.Y., Avramenko F.V., Kochergin A.S. Evaluation of the Efficiency of Row-Crop Seeds using Vacuum and Extrabaric Seed Metering Methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;659:012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012045>
21. Khizhnyak V.I., Kochergin A.S., Taranov V.A., Onishchenko E.A. Development of Dosing Module of Space Seeding Machine SSM-870. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2020;2(50):27–33. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **NDTIQJ**
22. Markvo I., Zubrilina E., Novikov V. Precise Seeding Planter Concept with Air Pumped Seedtube. *E3S Web of Conferences*. 2019;126:00054. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600054>
23. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Nesmian A.Yu., Kormiltsev Yu.G., Khizhnyak D.V. Theoretical Research Of The Process Of Dosing Seeds Using An Injection Air Flow. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2021;4(56):46–54. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3ChJQ3> (accessed 25.02.2024).

24. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. Ensuring the Operating Modes of the Seeding apparatus Specialized Equipment. *Tractors and Agricultural Machines*. 2021;88(4):6–12. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2021-4-6-12>
25. Kireev I.M., Koval Z.M., Zimin F.A. New Method and Means of Monitoring the Quality of Pneumatic Drilling Mechanism for Precision Seed Sowing. *Machinery and Equipment for the Village*. 2020;1(271):24–27. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-1-24-27>
26. Zavrazhnov A.I., Balashov A.V., Pustovarov N.Yu., Krishchenko A.V. Modernization of the Seed Sowing Control System on Rowed Seeders. *Selskiy Mechanizator*. 2021;7:8–9. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://selmech.msk.ru/721.html> (accessed 25.02.2024).
27. Popov A.Yu. Simulation of Square Cluster Planting. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(4):524–549. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.524-549>
28. Parihar C.M., Jat S.L., Singh A.K., Kumar R.S., Hooda K.S., Chikkappa G.K., Singh D.K. Maize Production Technologies in India. *DMR Technical Bulletin. Directorate of Maize Research, Pusa Campus, New Delhi-110012*. 2011. Available at: <https://imr.icar.gov.in/wp-content/uploads/2020/03/Maize-production-technologies-03012017.pdf> (accessed 25.02.2024).
29. Orjuela S., Pabon J., Fonseca M. Experimental Assessment of Emissions in Low Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends of Palm and Sunflower Oil. *International Journal on Engineering Applications*. 2021;9(3):128–136. <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19810>
30. Pozzolo O.R., Hidalgo R.J., Domínguez J.F., Giménez L. Corn (Zea Mais L.) Sowing Quality in the Province of Corrientes, Argentina. *Rev. FCA UNCUIY*. 2020;52(2):111–123. Available at: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/RFCA/article/view/4042> (accessed 25.02.2024).
31. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Kapov S.N., Shmatko G.G., Gerasimov E.V. Substantiation of Seed Discovery for Sowing Seeds. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018;9(3):985–996. Available at: <https://clck.ru/3CjFT9> (accessed 25.02.2024).
32. Nesmiyan A., Khasanov E., Dubina K., Iakupov A. Vacuum Planter's Seed Supply Quality as Affected by the Diameter of Suction Holes. *International Review of Automatic Control*. 2022;15(2):52–57. <https://doi.org/10.15866/ireaco.v15i2.21493>
33. Nesmiyan A., Kravchenko L., Khizhnyak V., Zubrilina E. Probabilistic Modeling for Dynamic Processes. *E3S Web of Conferences*. 2020;175:05019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505019>
34. Lobachevsky P. Ya., Khizhnyak V.I., Nesmian A.Yu., Avramenko F.V. [A Stand for Testing Seeding Machines for Precision Seeding Drills]. Patent 2356210 C1 Russian Federation. 2009 May 5. (In Russ.) Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2356210C1_20090527 (accessed 25.02.2024).
35. Nesmian A.Yu., Dubina K.P., Zhigailova A.P. Influence of Suction Hole Diameter of Precision Seed Machine on the Characteristics of Feeding Corn and Sunflower Seeds. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):21–36. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.021-036>

Об авторах:

Несмиян Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и средств механизации агропромышленного комплекса Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, Researcher ID: N-6221-2018, nesmiyan.andrei@yandex.ru

Дубина Константин Павлович, кандидат технических наук, ассистент кафедры технической механики и физики Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>, Researcher ID: GSD-2794-2022, longonor@yandex.ru

Бутенко Александр Федорович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики и физики Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9530-3001>, butenko.1977@mail.ru



Жигайлова Анастасия Павловна, аспирантка Азово-Черноморского инженерного института Донского ГАУ (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Ленина, 21), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0933>, Researcher ID: [GWQ-5701-2022](https://orcid.org/0000-0003-0904-0933), nastena30.1997@mail.ru

Войнаш Сергей Александрович, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальная мобильность» Казанского федерального университета (420008, Российская Федерация, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, Researcher ID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883), Scopus ID: [57194339935](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883), sergey_voi@mail.ru

Ореховская Александра Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальная мобильность» Казанского федерального университета (420008, Российская Федерация, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8149-7191>, Researcher ID: [AAO-7956-2021](https://orcid.org/0000-0001-8149-7191), Scopus ID: [57211231389](https://orcid.org/0000-0001-8149-7191), orehovskaja_aa@bsaa.edu.ru

Заявленный вклад авторов:

А. Ю. Несмиян – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка задачи исследования, доработка текста, формирование частных и общих выводов.

К. П. Дубина – анализ литературных источников, проведение экспериментальных исследований, критический анализ полученных результатов, подготовка первоначального варианта текста, формирование частных и общих выводов.

А. Ф. Бутенко – литературный и патентный анализ данных, проведение экспериментальных исследований, формирование частных и общих выводов.

А. П. Жигайлова – литературный и патентный анализ данных, проведение экспериментальных исследований, формирование частных и общих выводов. С. А. Войнаш – разработка теоретических предпосылок, участие в разработке методики опытов, обработка и анализ данных, формирование частных и общих выводов.

А. А. Ореховская – разработка теоретических предпосылок, участие в разработке методики опытов, обработка и анализ данных, визуализация материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 20.03.2024; поступила после рецензирования 17.05.2024;
принята к публикации 24.05.2024*

About the authors:

Andrey Yu. Nesmiyan, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technologies and Means of Mechanization of the Agroindustrial Complex, Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-1767>, Researcher ID: [N-6221-2018](https://orcid.org/0000-0002-5556-1767), nesmiyan.andrei@yandex.ru

Konstantin P. Dubina, Cand.Sci. (Eng.), Assistant of the Department of Theoretical Mechanics and Physics, Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0543-9306>, Researcher ID: [GSD-2794-2022](https://orcid.org/0000-0003-0543-9306), longonor@yandex.ru

Alexandr F. Butenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Physics, Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9530-3001>, butenko.1977@mail.ru

Anastasia P. Zhigailova, Postgraduate Student of the Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University (21 Lenin St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0933>, Researcher ID: [GWQ-5701-2022](https://orcid.org/0000-0003-0904-0933), nastena30.1997@mail.ru

Sergey A. Voinash, Junior Researcher at the Research Laboratory “Intelligent Mobility”, Kazan Federal University (18 Kremlin St., Kazan 420008, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>, Researcher ID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883), Scopus ID: [57194339935](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883), sergey_voi@mail.ru

Alexandra A. Orekhovskaya, Cand.Sci. (Agric.), Leading Researcher at the Research Laboratory “Intellectual Mobility”, Institute of Design and Spatial Arts (18 Kremlin St., Kazan 420008, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8149-7191>, Researcher ID: [AAO-7956-2021](https://orcid.org/0000-0001-8149-7191), Scopus ID: [57211231389](https://orcid.org/0000-0001-8149-7191), orehovskaja_aa@bsaa.edu.ru

Authors contribution:

A. Y. Nesmiyan – scientific guidance, formulation of the basic concept of the research, formulation of the research task, revision of the text, formation of particular and general conclusions.

K. P. Dubina – analyzing literary sources, conducting experimental research, critical analysis of the results obtained, preparation of the initial version of the text, formation of particular and general conclusions.

A. F. Butenko – literary and patent analysis of the data, conducting experimental studies, forming particular and general conclusions.

A. P. Zhigailova – literary and patent data analysis, conducting experimental research, forming private and general conclusions.

S. A. Voinash – development of theoretical prerequisites, participation in the development of experimental methods, data processing and analysis, formation of private and general conclusions.

A. A. Orekhovskaya – development of theoretical prerequisites, participation in the development methods of experiments, data processing and analysis, visualization of materials.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 20.03.2024; revised 17.05.2024; accepted 24.05.2024



Моделирование и оценка уровня плодородия почвы

Н. И. Джаббаров¹, А. П. Мишанов¹✉, А. В. Добринов¹,
А. П. Савельев²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства (ИАЭП) –
филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

✉ amishanov@mail.ru

Аннотация

Введение. Актуальность темы исследования связана с проблемой повышения плодородия почвы. Ценность почвы как основного средства аграрного производства в конкретной хозяйственной инфраструктуре определяется ее плодородием, то есть способностью удовлетворять потребности конкретных растений в элементах питания, воде, обеспечивать их корневые системы воздухом и теплом. Эффективность процесса повышения плодородия почвы зависит от ее объективной оценки и прогнозирования, поэтому математическое моделирование уровня плодородия почв сельскохозяйственных угодий для производства сельскохозяйственной продукции является актуальной задачей агроинженерных исследований.

Цель исследования. Разработка математической модели для комплексной оценки уровня плодородия почвы.

Материалы и методы. При проведении научной работы были применены аналитические методы, обобщены посвященные данной проблеме исследования, проведенные различными учеными. Объектом изучения послужили опубликованные результаты научных исследований авторов, полученные по существу рассматриваемого вопроса.

Результаты исследования. На основе анализа литературы был обоснован перечень наиболее значимых показателей оценки, влияющих на плодородие почвы: содержание органического вещества (гумуса), кислотность, влажность, пористость почвы, микроорганизмы и глинистые частицы в почве, содержание подвижных форм азота, фосфора, обменного калия. Разработана математическая модель, позволяющая оценить по предложенным показателям уровень плодородия почвы.

Обсуждение и заключение. Приведены примеры расчета по средним и базовым значениям показателей с использованием предложенной математической модели, которые дают представление о наиболее типичных процедурах формирования показателей и оценки рассматриваемого процесса. Значение вероятностного коэффициента плодородия $L_F < 1$ свидетельствует об истощении (деградации) почвы, что не обеспечит получение экономически оправданного урожая. При этом состоянии требуется провести мероприятия для повышения плодородия почвы. В случае, когда $L_F > 1$, почва является плодородной и способна снабжать растения питательными веществами, водой и воздухом для их

© Джаббаров Н. И., Мишанов А. П., Добринов А. В., Савельев А. П., 2024



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

полноценного роста и развития. Таким образом, уровень плодородия почвы является важным критерием оценки влияния агротехнологий на экологическую безопасность и устойчивое состояние окружающей среды.

Ключевые слова: уровень плодородия почвы, показатели комплексной оценки, математическая модель, вероятностный коэффициент

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Моделирование и оценка уровня плодородия почвы / Н. И. Джабборов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 407–423. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>

Modeling and Assessment of Soil Fertility Level

N. I. Jabborov^a, A. P. Mishanov^a ✉, A. V. Dobrinov^a,
A. P. Savelyev^b

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

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

✉ amishanov@mail.ru

Abstract

Introduction. The relevance of the study is related to the problem of increasing soil fertility. The value of soil as the main means of agricultural production in a specific economic infrastructure is determined by its fertility that is its ability to satisfy the needs of specific plants for nutrients, water, and to provide the root system of plants with air and heat. The effectiveness of increasing soil fertility depends on objective soil assessments and forecasting. Therefore, mathematical modeling for the fertility level of soils for the agricultural production is an urgent task for agroengineering studies.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a mathematical model for an integrated assessment of soil fertility levels.

Materials and Methods. When conducting the study, analytical methods were used and the results obtained by various authors on this problem were summarized. The object of the study was the published results of scientific researches by the authors from other scientific institutions obtained on the problem under consideration.

Results. Based on an analysis of the literature references, there was made a scientifically-based list of the most significant indicators for assessing soil fertility, which includes the content of organic matter (humus), acidity, humidity, soil porosity, presence of microorganisms and clay particles, content of mobile forms of nitrogen, phosphorus and exchangeable potassium. A mathematical model has been developed based on the criterion of maximum soil fertility, which makes it possible to assess the level of soil fertility using the proposed indicators.

Discussion and Conclusion. The examples of calculations based on average and basic values of indicators with the use of the proposed mathematical model are presented. They give an idea of the most typical procedures for generating indicators and assessing the process under consideration. The value of the fertility probabilistic coefficient $L_F < 1$ indicates soil depletion (degradation), which will not ensure an economically sound harvest. In this case, measures must be taken to increase soil fertility. When $L_F > 1$, the soil is fertile and is able to supply plants with nutrients, water and air for their growth and development. The soil fertility level is an important criterion for assessing the impact of agricultural technologies on environmental safety and the environment state.



Keywords: soil fertility level, integrated assessment indicators, mathematical model, probabilistic coefficient

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

For citation: Jabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V., Savelyev A.P. Modeling and Assessment of Soil Fertility Level. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):407–423. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>

Введение. Плодородие – это способность почвы удовлетворять потребности растений в элементах питания, воде, обеспечивать их корневые системы достаточным количеством воздуха, тепла и благоприятной физико-химической средой для нормального их роста и развития. Плодородие является важнейшим свойством почвы. Питание, вода, воздух, тепло – главные слагаемые плодородия почв. В почвоведении принято различать следующие виды плодородия:

- естественное (сложившееся на основе природного течения процессов почвообразования, без участия человека; к такому виду, например, относятся целинные земли);
- естественно-антропогенное (складывается на основе естественного почвообразования и сознательных действий человека в этой сфере);
- искусственное (складывается посредством действий человека на основе ряда комбинаций факторов плодородия, обычно формируется при создании и использовании субстратов, предназначенных для возделывания сельскохозяйственных культур в условиях защищенного грунта);
- относительное (складывается в отношении некой культуры, а также ряда культур, имеющих схожие биологические показатели);
- потенциальное (представляет собой определенную совокупность характеристик почвы, с помощью которых растения могут получать продолжительный период важные микроэлементы для роста и развития);
- эффективное (поддерживает продуктивность растений и зависит от наличия благоприятных погодных показателей);
- экономическое (определяется по уровню затрат на получение планируемой урожайности в стоимостных показателях).

Оценка плодородия почв имеет первостепенное значение для формирования величины урожайности и базируется на основе значений отдельных показателей всех основных свойств почв, определяющих продуктивность растений¹.

Цель работы – обоснование наиболее значимых показателей плодородия почвы, моделирование процесса формирования и оценка ее уровня.

¹ ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.; ГОСТ 26212-2021. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.; ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М. : Стандартинформ, 2016. 19 с.; ГОСТ Р 54650-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М. : Стандартинформ. 2013. 8 с.; Микроорганизмы почвы [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/6-52859.html> (дата обращения: 22.04.2024).; Качинский Н. А. Физика почв. Часть 1. М. : Высшая школа, 1965. 320 с.; Гродзинский А. М. Аллелопатия растений и почвоутомление: избранные труды. Киев : Наукова думка, 1991. 432 с.

Обзор литературы. Одной из неразрешенных проблем современной науки является обеспечение экологической безопасности технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции. Именно в земледелии особое значение приобрели вопросы поддержания почвенного плодородия для обеспечения роста культурных растений и повышения их урожайности.

Авторы работы [1] исследовали влияние различных по интенсивности систем обработки почвы, удобрений и пестицидов на содержание органического вещества в почве, агрофизические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур. В результате установлено, что на дерново-среднеподзолистой глееватой среднесуглинистой почве рационально использовать поверхностно отвальную обработку (SP) по фону SNPK (солома + NPK). Такой комбинированный прием дает значительное увеличение содержания органического вещества в почве, а также способствует улучшению ее агрофизических свойств.

Автором статьи [2] проведен анализ пространственной изменчивости показателей в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Им установлено, что в пределах одного поля коэффициент оборота агрохимических показателей дохода колеблется в пределах от 10 до 67 %. Это обстоятельство указывает на дисбаланс между продуктами питания в исследуемой почве. Для оптимального питания растений требуется применять в рациональном соотношении азот, калий, цинк и медь.

В исследовании [3] оценено плодородие дерново-подзолистой почвы в севообороте на основе существующих систем удобрений. Оказалось, что органическая система удобрений замедляет подкисление почвы, повышает ее структурно-агрегатный состав, гумус. Используемый при этом навоз в дозах 5 и 10 т на га не поддерживает необходимый уровень органического вещества почвы.

В исследовании [4] изложены результаты оценки гумусового состояния и микроэлементного фонда почвы природных и агрогенных экосистем степной зоны. Установлено, что под влиянием интенсивного использования нарушается функционирование почвы как экологически уравновешенной системы, процессы накопления гумуса более интенсивно проходят в основном корнесодержащем слое почвы (0–40 см).

Авторы работы [5] предлагают общее состояние плодородия почвы оценивать по ряду групповых показателей, среди которых основными являются динамичные (подвижные элементы питания, кислотность), конституционные прямые (минералогический, гранулометрический, органический и химический составы), конституционные косвенные (емкость катионного обмена, сорбционная емкость, буферность).

В работе [6] установлено, что комплексное применение минеральных и органических удобрений повышает обеспеченность почвы подвижным фосфором. Наблюдается улучшение агрохимических показателей роста продуктивности севооборота на 3,9–4,1 т к.е./га.

Авторами исследования [7] оценка и оптимизация плодородия почвы производилась с помощью кластерного анализа, дискриминантного анализа и метода главных компонент (МГК). Показатель МГК позволил определить вклад каждого почвенного параметра в разделении на группы.

Результаты исследования авторов [8], полученные в ходе продолжительного эксперимента на черноземе, дали возможность оценить преобразования агрофизических, агрохимических и биологических свойств почвы в шестипольном обороте в условиях проведения нескольких систем обработки почвы. Так, минимальная мульча создает необходимое соотношение факторов минерализации и гумификации органического вещества, по сравнению с традиционной, улучшает структуру почвы. При этом урожайность возделываемых культур (озимая пшеница, подсолнечник) практически не зависела от системы основной обработки. Отмечается, что высокая урожайность таких культур, как соя и кукуруза, была получена при традиционной системе.

В работе [9] проведена оценка исходного состояния плодородия пашни на основе агрохиманализа (содержание гумуса, азота, фосфора, калия и гидролитической кислотности) в соответствии с «интегральным показателем плодородия земли», предложенным учеными С. А. Пеговым и П. М. Хомяковым, благодаря которому был определен вектор действий, позволяющих повысить эффективность комплекса мелиоративных мероприятий.

Авторами [10] разработана методика оценки степени деградации почв в яблоневых садах и обоснована возможность оценки степени деградации местности как характеристики уровня агротехники в сельском хозяйстве.

Установлено, что приемлемое почвенное плодородие достигается при обменной кислотности не ниже 5,2–5,4 ед., при содержании подвижных форм калия и фосфора не ниже 125–143 и 170–194 мг/кг соответственно [11].

Исследованием [12] обосновано, что изменение структуры посевных площадей и севооборотов приведет к уменьшению антропогенной нагрузки, а также себестоимости продукции, производимой с 1 га, и тем самым повысит устойчивость агроэкосистемы.

В работе [13] при исследовании эффективности дифференцированного внесения удобрений при точном земледелии применена установка, которая позволяет контролировать ряд показателей плодородия почвы с использованием разработанного экспериментального твердомера.

Оценка уровня плодородия почвы проводилась по содержанию серы и микроэлементов, экотоксикологического ее состояния – по валовым и подвижным формам тяжелых металлов и мышьяка [14]. Также был установлен характер взаимовлияния обменной кислотности, количества органического вещества и гранулометрического состава почв с содержанием доступных форм микроэлементов, валовых и подвижных форм металлов и мышьяка.

Автором статьи [15] предложен комплексный способ геоэкологической оценки сельскохозяйственного использования, на основе которого определяют несколько показателей с выделением их в группы: агрохимические, деградация, физическое состояние почв, содержание микроэлементов-загрязнителей.

В работе [16] рассмотрено радиоактивное загрязнение почв как самостоятельный тип деградации, ведущий к снижению их плодородия. Описана естественная радиоактивность почв, проанализированы вопросы реабилитации почв сельскохозяйственного назначения при радиационных авариях, связанных с выбросом техногенных радионуклидов в окружающую среду.

Одним из наиболее весомых показателей оценки для поддержания водного и воздушного режимов питания растений является плотность почвы. С увеличением плотности происходит уменьшение пористости почвы, что приводит к снижению ее плодородия. Одной из проблем является кумулятивный эффект переуплотнения, при многократных проездах движителей машинно-тракторных агрегатов. Образованный при этом уплотненный слой ухудшает физические и биохимические свойства почвы. Замечено, что в переуплотненном слое почвы отсутствуют дождевые черви, с помощью которых питательные вещества в почве преобразуются в усвояемую растениями форму [17].

В работе [18] изложены научные принципы снижения энергетических, трудовых, а также финансовых вложений, направленных на восстановление заброшенных сельскохозяйственных угодий, а также на воспроизводство плодородия при введении в оборот земель имеющих высокую влажность.

В исследовании [19] предложены агроэкологические принципы формирования зональной системы обработки почвы. Из результатов исследований следует, что при выборе технологий возделывания сельскохозяйственных культур следует опираться на дифференциацию способов и приемов обработки с учетом особенностей агроландшафта, свойств и степени плодородия, вида культуры, уровня влияния эрозии, гидрологических условий, фитосанитарного состояния почвы. Система дифференциации дает возможность улучшить экологическую безопасность технологий, а также повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции.

Для обобщенной оценки плодородия почвы часто используют агропроизводственные факторы, с помощью которых можно осуществлять прогноз состояния (динамики) отдельных показателей плодородия. При этом учитываются освещенность, тепло, влагообеспеченность, наличие гумуса, питательные вещества, реакция почвенной среды, густота растений и другие весомые показатели, основным из которых является урожайность.

И. И. Кармановым предложен расчет², основанный на нахождении интегрального показателя различных свойств (содержание гумуса, подвижного фосфора и обменного калия в зависимости от типа почв, pH и гидролитической кислотности, степени насыщенности почв основаниями) с построением математической модели преобразования свойств почв с учетом их воздействия на общий уровень плодородия.

Также распространены действующие способы оценки плодородия почв по относительному и совокупному баллам. В первом случае расчет проводят по следующим агрохимическим показателям: кислотность почвы, содержание гумуса, фосфора, калия, кальция, магния, основных микроэлементов, сумма поглощенных оснований и степень насыщенности почв основаниями. Во втором случае с учетом уже имеющихся показателей дополнительно определяют мощность гумусового горизонта, запасы гумуса в гумусовом горизонте, содержание физической глины в пахотном слое.

² Карманов И. И. Плодородие почв СССР (Природные закономерности и количественная оценка). М. : Колос, 1980. 224 с.

Л. М. Державин, А. С. Фрид [20] предложили основной оценочный балл для полного плодородия почв определять по элементам питания растений. Действие других факторов учитывается через поправочные коэффициенты, один из которых является ключевым.

В утвержденной Министерством сельского хозяйства РФ методике плодородие можно рассчитывать, исходя из установленного перечня показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения. В основу расчета берется усредненное значение от суммы соотношений фактических значений четырех агрохимических показателей (кислотность почв, содержание гумуса, подвижных форм фосфора и обменного калия) к их оптимальным значениям по типам почв посевных площадей сельскохозяйственных культур³.

Отечественный производственный опыт и представленные результаты научных исследований свидетельствуют, что для эффективной оценки плодородия земель сельскохозяйственного назначения необходим комплексный подход, обеспечивающий учет ряда интегральных показателей. Для достоверной полной оценки требуется моделирование процесса изменения плодородия почвы на основе наиболее весомых оценочных показателей, таких как содержание органического вещества (гумуса), кислотность, влажность, содержание подвижных форм азота, фосфора и калия, пористость, количество микроорганизмов (бактерий и грибов), содержание глинистых частиц в почве.

Материалы и методы. При проведении настоящего исследования были использованы аналитические методы, обобщены результаты, полученные различными авторами, изучающими проблему оценки плодородия почвы.

Объектами исследований послужили научные статьи и нормативные документы, посвященные оценке плодородия почвы.

Исследования проводились поэтапно в следующей последовательности: анализ литературных источников; определение наиболее весомых показателей оценки плодородия почвы; формализация основного критерия оценки плодородия почвы; разработка математической модели для комплексной оценки плодородия почвы.

Результаты исследования. Исходя из представленного анализа результатов исследований, мы определили, что на плодородие почвы в значительной степени оказывают влияние содержание органического вещества, кислотность, влажность, пористость почвы, содержание подвижных форм фосфора, калия, микроорганизмов и глинистых частиц.

В этом случае плодородие почвы может быть выражено формулой:

$$F_s = f(X_{\text{гум}}, \text{pH}, W, N_n, P_2O_5, K_2O, X_{\text{пор}}, K_{\text{мо}}, n_{\text{гл}}),$$

где $X_{\text{гум}}$ – содержание органического вещества (гумуса) в почве, %; pH – кислотность почвы, ед.; W – влажность почвы, %; N_n – содержание подвижных форм азота в почве, мг/кг; P_2O_5 – содержание в почве подвижных форм фосфора, мг/кг;

³ Об утверждении Методики расчета показателя почвенного плодородия в субъекте Российской Федерации [Электронный ресурс] : Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 6 июля 2017 г. № 325. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456080018?marker=65401N> (дата обращения: 25.04.2024).

K_2O – содержание в почве обменного калия, мг/кг; $X_{\text{пор}}$ – пористость почвы, %; $K_{\text{мо}}$ – количество микроорганизмов (бактерий и грибов), КОЕ в 1 г почвы (колониеобразующая единица (КОЕ) – величина, которая показывает количество микробных клеток (бактерий, грибов и т. д.) или неклеточных форм жизни (вирусов и вирионов) в образце, которые являются жизнеспособными и (или) способными размножаться путем деления в контролируемых условиях); $n_{\text{гл}}$ – содержание глинистых частиц в почве, %.

На рисунке представлена схема определения критерия максимума плодородия почвы, оцениваемого по вероятностному коэффициенту $L_{F_s} \rightarrow \text{тах}$ в соответствии с представленными оценочными показателями.

Оценку степени плодородия почвы следует производить по вероятностному коэффициенту – максимуму плодородия почвы $L_{F_s} \rightarrow \text{тах}$.

Вероятностный коэффициент L_{F_s} , показывающий степень плодородия почвы, может быть рассчитан по формуле:

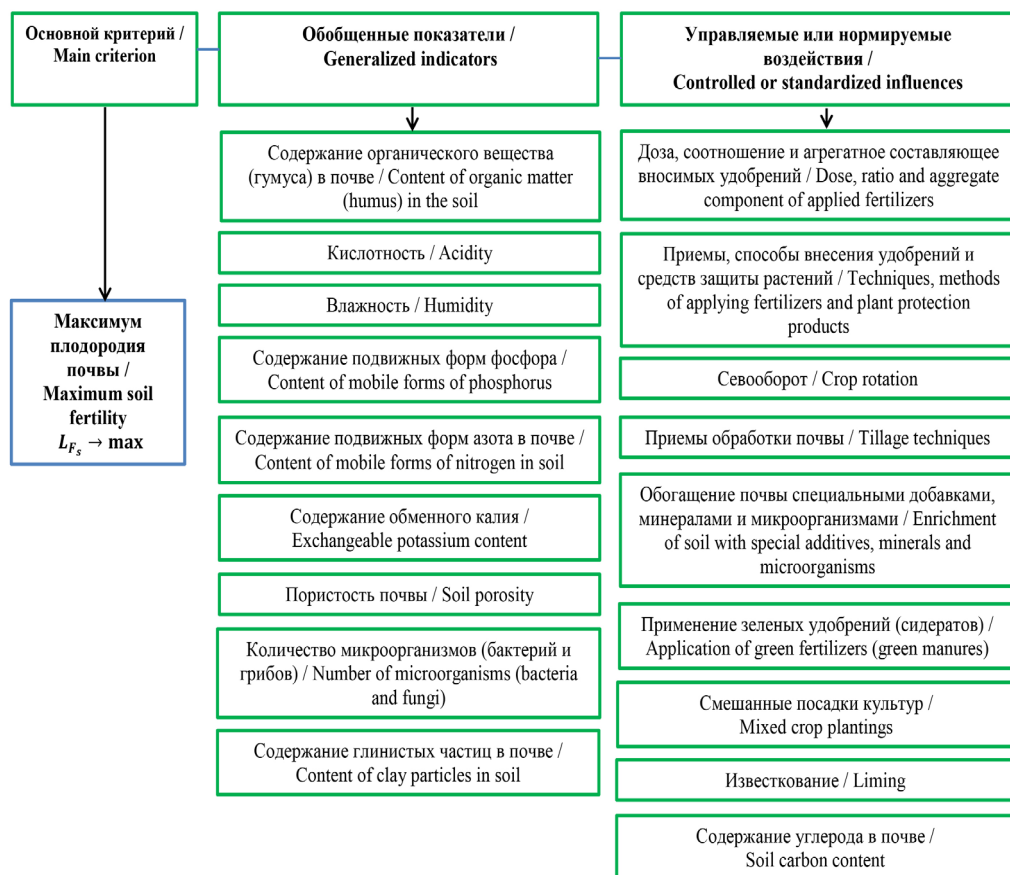
$$L_{F_s} = \frac{1}{9} \left(L_{X_{\text{гум}}} + L_{\text{рН}} + L_{\text{w}} + L_{N_n} + L_{\text{P}_2\text{O}_5} + L_{K_2O} + L_{X_{\text{пор}}} + L_{K_{\text{мо}}} + L_{n_{\text{гл}}} \right), \quad (1)$$

где $L_{X_{\text{гум}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания органического вещества (гумуса) в почве; $L_{\text{рН}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень кислотности почвы; L_{w} – вероятностный коэффициент, показывающий уровень влажности почвы; L_{N_n} – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания подвижных форм азота в почве; $L_{\text{P}_2\text{O}_5}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания в почве подвижных форм фосфора; L_{K_2O} – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания в почве обменного калия; $L_{X_{\text{пор}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень пористости почвы; $L_{K_{\text{мо}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень обеспечения почвы микроорганизмами (бактериями и грибами); $L_{n_{\text{гл}}}$ – вероятностный коэффициент, показывающий уровень содержания глинистых частиц в почве.

Вероятностный коэффициент $L_{X_{\text{гум}}}$, показывающий уровень содержания органического вещества (гумуса) в почве, можно определить из выражения:

$$L_{X_{\text{гум}}} = \frac{X_{\text{гум}}^{\text{ср}}}{X_{\text{гум}}^{\text{б}}},$$

где $X_{\text{гум}}^{\text{ср}}$ – среднее значение содержания органического вещества (гумуса) в почве; $X_{\text{гум}}^{\text{б}}$ – базовое (нормативное) значение содержания органического вещества (гумуса) в почве.



Р и с. Схема для определения критерия максимума плодородия почвы, оцениваемого по вероятностному коэффициенту $L_{F_s} \rightarrow \max$ с другими зависящими от него показателями

F i g. Scheme for determining the criterion for maximum soil fertility, assessed by the probability coefficient $L_{F_s} \rightarrow \max$ with other indicators that depend on it

Источник: составлено авторами статьи.

Source: the diagram is compiled by the authors of the article.

Вероятностный коэффициент L_{pH} , показывающий уровень кислотности почвы, можно определить из выражения:

$$L_{pH} = \frac{(pH)^{cp}}{(pH)^6}, \quad (2)$$

где $(pH)^{cp}$ – среднее значение кислотности почвы; $(pH)^6$ – базовое (нормативное) значение кислотности почвы.

Вероятностный коэффициент L_{μ} , показывающий уровень влажности почвы, может быть рассчитан по формуле:

$$L_W = \frac{W^{\text{cp}}}{W^6}, \quad (3)$$

где W^{cp} – среднее значение влажности почвы; W^6 – базовое значение влажности почвы.

Вероятностный коэффициент L_{N_n} , показывающий уровень содержания подвижных форм азота в почве, можно определить из выражения:

$$L_{N_n} = \frac{N_n^{\text{cp}}}{N_n^6},$$

где N_n^{cp} – среднее значение подвижных форм азота в почве; N_n^6 – базовое значение подвижных форм азота в почве.

Вероятностный коэффициент $L_{P_2O_5}$, показывающий уровень содержания в почве подвижных форм фосфора, можно представить в виде:

$$L_{P_2O_5} = \frac{(P_2O_5)^{\text{cp}}}{(P_2O_5)^6},$$

где $(P_2O_5)^{\text{cp}}$ – среднее значение содержания в почве подвижных форм фосфора; $(P_2O_5)^6$ – базовое значение содержания в почве подвижных форм фосфора.

Вероятностный коэффициент L_{K_2O} , показывающий уровень содержания в почве обменного калия, можно найти по уравнению:

$$L_{K_2O} = \frac{(K_2O)^{\text{cp}}}{(K_2O)^6},$$

где $(K_2O)^{\text{cp}}$ – среднее значение содержания в почве обменного калия L_{K_2O} ; $(K_2O)^6$ – базовое (нормативное) значение содержания в почве обменного калия.

Вероятностный коэффициент $L_{X_{\text{пор}}}$, показывающий уровень пористости почвы, определяют из соотношения:

$$L_{X_{\text{пор}}} = \frac{X_{\text{пор}}^{\text{cp}}}{X_{\text{пор}}^6}, \quad (4)$$

где $X_{\text{пор}}^{\text{cp}}$ – среднее значение пористости почвы; $X_{\text{пор}}^6$ – базовое значение пористости почвы.

Вероятностный коэффициент $L_{K_{\text{мо}}}$, показывающий уровень обеспечения почвы микроорганизмами (бактериями и грибами), определяется с помощью уравнения:

$$L_{K_{\text{мо}}} = \frac{K_{\text{мо}}^{\text{cp}}}{K_{\text{мо}}^6},$$



где $K_{\text{мо}}^{\text{ср}}$ – среднее значение количества микроорганизмов (бактерий и грибов) в почве; $K_{\text{мо}}^{\text{б}}$ – базовое количество микроорганизмов (бактерий и грибов) в почве.

Вероятностный коэффициент $L_{n_{\text{гл}}}$, показывающий уровень содержания глинистых частиц в почве, можно найти по уравнению:

$$L_{n_{\text{гл}}} = \frac{n_{\text{гл}}^{\text{ср}}}{n_{\text{гл}}^{\text{б}}}, \quad (5)$$

где $n_{\text{гл}}^{\text{ср}}$ – среднее значение содержания глинистых частиц в почве; $n_{\text{гл}}^{\text{б}}$ – базовое значение содержания глинистых частиц в почве.

Сущность предложенной модели сводится к объединению отдельно рассчитываемых показателей оценки и прогнозирования плодородия почвы в единое целое. Такой подход позволяет дать комплексную оценку плодородия почвы. В таблице приведены базовые и средние значения показателей, а также подсчитано значение коэффициента (показателя) L_{F_s} для оценки степени плодородия почвы.

Следует отметить, что если при оценке кислотности (рН), влажности (W) и пористости ($X_{\text{пор}}$) почвы, а также при оценке содержания глинистых частиц в почве ($n_{\text{гл}}$) численные значения соответствующих коэффициентов $L_{\text{рН}}$, L_W , $L_{X_{\text{пор}}}$ и $L_{n_{\text{гл}}} > 1$, то это свидетельствует об ухудшении плодородия почвы. В этом случае, при расчете коэффициентов $L_{\text{рН}}$, L_W , $L_{X_{\text{пор}}}$ и $L_{n_{\text{гл}}}$ по формулам (2), (3), (4) и (5), базовые значения показателей необходимо разделить на средние (фактические) их значения.

Ниже представлены два варианта расчета показателей плодородия почвы:

– в варианте 1 средние (фактические) значения показателей не превышают базовые значения;

– в варианте 2 средние (фактические) значения показателей превышают базовые значения.

По данным таблицы вероятностный коэффициент L_{F_s} , показывающий степень плодородия почвы для варианта 1, равен:

$$\begin{aligned} L_{F_s} &= \frac{1}{9} \left(L_{X_{\text{гум}}} + L_{\text{рН}} + L_W + L_{N_n} + L_{\text{P}_2\text{O}_5} + L_{\text{K}_2\text{O}} + L_{X_{\text{пор}}} + L_{K_{\text{мо}}} + L_{n_{\text{гл}}} \right) = \\ &= \frac{1}{9} (0,90 + 0,93 + 0,88 + 0,73 + 0,80 + 0,82 + 0,91 + 0,80 + 0,93) = 0,86. \end{aligned}$$

Для варианта 2:

$$\begin{aligned} L_{F_s} &= \frac{1}{9} \left(L_{X_{\text{гум}}} + L_{\text{рН}} + L_W + L_{N_n} + L_{\text{P}_2\text{O}_5} + L_{\text{K}_2\text{O}} + L_{X_{\text{пор}}} + L_{K_{\text{мо}}} + L_{n_{\text{гл}}} \right) = \\ &= \frac{1}{9} (2,25 + 0,72 + 0,64 + 1,95 + 1,6 + 1,36 + 0,85 + 2,5 + 0,63) = 1,39. \end{aligned}$$

Показатели и вероятностные коэффициенты оценки плодородия почвы

Indicators and probability coefficients for assessing soil fertility

Значение / Meaning	$X_{гум}$, %	pH, ед.	W , %	N_n , мг/кг / mg/kg	P_2O_5 , мг/кг / mg/kg	K_2O , мг/кг / mg/kg	$X_{пор}$, %	$K_{мо}$, КОЕ в 1 г почвы / CFU in 1 g of soil	$n_{гл}$, %
Базовое / Basic	2,0	5,5	16	41	250	220	55	$1,0 \cdot 10^9$	40
Среднее (вариант 1) / Average (option 1)	1,80	5,10	14	30	200	180	50	$0,8 \cdot 10^9$	37
Вероятностный коэффициент L (вариант 1) / Probability coefficient L (option 1)	0,90	0,93	0,88	0,73	0,80	0,82	0,91	0,80	0,93
Среднее (вариант 2) / Average (option 2)	4,50	7,60	25	80	400	300	65	$2,5 \cdot 10^9$	63
Вероятностный коэффициент L (вариант 2) / Probability coefficient L (option 2)	2,25	0,72	0,64	1,95	1,60	1,36	0,85	2,50	0,63

При соответствии средних (фактических) значений показателей базовым значениям показателей вероятностные коэффициенты будут равны или будут стремиться к единице. Если значение коэффициента $L_{F_s} < 1$, то это свидетельствует об истощении почвы. При этом требуется разработка мероприятий по восстановлению плодородия почвы, чтобы обеспечить высокую рентабельность производства продукции растениеводства.

Анализ литературных источников показал, что для оценки уровня плодородия почвы в различных природно-климатических условиях применяют показатели, характеризующие ландшафтно-экологические, эколого-генетические, физические, водно-физические, агрохимические, биологические и эколого-токсикологические особенности почвы. Вместе с тем, перечень показателей оценки плодородия почвы должен уточняться для конкретных условий производства сельскохозяйственной продукции.

Предложенный нами критерий (максимум уровня плодородия почвы $L_{F_s} \rightarrow \max$) обеспечивает комплексную оценку уровня плодородия почвы



с учетом наиболее весомых показателей, перечень которых приведен на рисунке и используется при расчетах по формуле (1).

Оценка уровня плодородия почвы по формуле (1) дает возможность разработать мероприятия, направленные на поддержание или воспроизводство плодородия почвы. Одним из вариантов поддержания плодородия почвы является предложенное российскими и финскими учеными производство продукции с использованием органических удобрений без применения химических средств защиты растений от вредителей и болезней для получения продукции высокого качества с минимальным негативным воздействием на окружающую среду [21].

Рассмотренные показатели плодородия почвы также являются наиболее весомыми показателями при оценке антропогенного воздействия на экологические параметры агроэкосистемы – диффузной нагрузки на водные объекты и выбросы климатически активных веществ.

В совокупности оценка по данным показателям позволит своевременно осуществлять мероприятия по обеспечению устойчивого состояния окружающей среды.

Обсуждение и заключение. На основе аналитического обзора выбраны наиболее весомые показатели оценки уровня плодородия почвы: содержание органического вещества (гумуса), кислотность, влажность, пористость почвы, содержание подвижных форм азота, фосфора, калия, количество микроорганизмов и глинистых частиц в почве.

Разработана математическая модель для комплексной оценки уровня плодородия почвы с учетом выбранных показателей.

Рассмотрены примеры расчета по средним и базовым значениям показателей с использованием предложенной математической модели, которые дают представление о наиболее типичных процедурах формирования показателей и оценки рассматриваемого процесса.

Предложенная методика позволяет рассчитать уровень плодородия почвы и заключить, что при $L_F < 1$ почва является истощенной, при этом появляется необходимость в проведении мелиоративных работ. При $L_F > 1$, почва считается плодородной, что обеспечивает высокую рентабельность производимой сельскохозяйственной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка действия энергосберегающих технологий основной обработки почвы на содержание органического вещества и агрофизические показатели плодородия / С. В. Щукин [и др.] // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 4 (56). С. 119–126. URL: <https://clck.ru/3CkNWs> (дата обращения: 25.04.2024).
2. Мудрых Н. М. Оценка плодородия почвы – основа сбалансированности питания растений // АгроЭкоИнфо. 2018. № 3. URL: https://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_320.doc (дата обращения: 25.04.2024).
3. Кузьменко Н. Н. Оценка плодородия дерново-подзолистой почвы при применении разных систем удобрений в севообороте // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2019. № 1 (41). С. 38–44. EDN: WSTBDU

4. Подобед О. Ю., Чабан В. И. Оцінка окремих показників родючості ґрунту природних і агрогенних екосистем зони степу // Зернові культури. 2018. Т. 2, № 2. С. 330–336. EDN: [XJMPUN](#)
5. Оценка конституционной основы плодородия агросерой почвы / А. В. Ручкина [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 1. С. 57–61. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/57-61>
6. Наумченко Е. Т., Банецкая Е. В. Оценка изменения плодородия почвы и продуктивности агроценоза при длительном внесении удобрений // Плодородие. 2023. № 1 (130). С. 39–41. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.130.09>
7. Оценка и оптимизация плодородия агросерой почвы методами многомерного статистического анализа / Р. Н. Ушаков [и др.] // Агрохимия. 2022. № 12. С. 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0002188122120134>
8. Оценка изменения плодородия чернозема выщелоченного Краснодарского края в зависимости от систем основной обработки почвы / П. П. Васюков [и др.] // Плодородие. 2018. № 3 (102). С. 17–20. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.102.06>
9. Гумбаров А. Д., Долобешкин Е. В. Оценка исходного агрохимического индекса плодородия пашни по средневзвешенным интегральным показателям // Новые технологии. 2019. № 2 (48). С. 204–216. <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10220>
10. Агроэкологическая оценка степени деградации лугово-черноземной почвы в яблоневых садах на примере ФГПУ «Мичуринское» Тамбовской области / В. Л. Захаров [и др.] // АгроЭкоИнфо. 2023. № 3. URL: https://www.agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2023/st_316_annot.html (дата обращения: 25.04.2024).
11. Ушаков Р. Н., Ручкина А. В., Елизаров А. О. К вопросу об информационном управлении плодородием почв // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2021. Т. 13, № 3. С. 85–92. EDN: [TKEEGZ](#)
12. Агроэкологическая оценка аграрного землепользования как основа повышения его устойчивости / А. А. Бунин [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2021. № 4 (169). С. 80–86. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Милоткин В. А., Канаев М. А. Разработка технических средств мониторинга плодородия почв с исследованием эффективности дифференцированного внесения удобрений при точном земледелии // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (64). С. 92–95. EDN: [YMXGUJ](#)
14. Уткин А. А. Мониторинг плодородия и экотоксикологического состояния реперных участков дерново-подзолистых почв Ивановской области // Агрохимия. 2023. № 4. С. 19–31. <https://doi.org/10.31857/S0002188123040130>
15. Волощенко И. В. Геоэкологическая оценка обрабатываемых почв // Успехи современного естествознания. 2023. № 4. С. 32–37. <https://doi.org/10.17513/use.38021>
16. Алексахин Р. М. Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1487–1498. EDN: [KYGCWP](#)
17. Окунев Г. А., Астафьев В. Л., Кузнецов Н. А. Влияние уплотняющего воздействия на почву в реализации энергосберегающих технологий // АПК России. 2017. Т. 24, № 5. С. 1188–1194. EDN: [ZXVRFD](#)
18. Джаббаров Н. И., Федькин Д. С., Михайлов А. С. Обоснование системы технологических процессов восстановления необрабатываемых земель в условиях повышенного увлажнения // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 5 (10). С. 66–68. EDN: [TAQOXH](#)
19. Джаббаров Н. И., Добринов А. В., Федькин Д. С. Агроэкологические принципы формирования зональной системы обработки почвы // Региональная экология. 2015. № 5 (40). С. 23–27. EDN: [VDWGMZ](#)
20. Державин Л. М., Фрид А. С. О комплексной оценке плодородия пахотных земель // Агрохимия. 2001. № 9. С. 5–12. EDN: [VLZVGZ](#)
21. Подходы к освоению органического земледелия / Д. А. Максимов [и др.] // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 4 (105). С. 101–113. EDN: [FEVOAU](#)



REFERENCES

1. Shchukin S.V., Gornich E.A., Trufanov A.M., Voronin A.N. Assessment of the Effect of Energysaving Primary Tillage Technologies on Organic Matter Content and Agrophysical Properties of the Soil. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2019;4(56):119–126. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3CkNWs> (accessed 25.04.2024).
2. Mudryh N.M. [Assessment of Soil Fertility – Basis of Balanced Power of Nutrition Plants]. *AGRO-ECOINFO*. 2018;3. (In Russ.) Available at: https://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_320.doc (accessed 25.04.2024).
3. Kuzmenko N.N. Estimation of Fertility of Sod-Podzolic Soil in the Application of Different Systems of Fertilizers in Crop Rotation. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2019;1(41):38–44. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WSTBDU**
4. Podobed O.U., Chaban V.I. Estimation of Separate Indices of Soil Fertility of Natural and Agro-genic Ecosystems of the Steppe Zone. *Grain Grops*. 2018;2(2):330–336. (In Ukr., abstract in Eng.) EDN: **XJMPUN**
5. Ruchkina A.V., Ushakov R.N., Novikov N.N., Ushakova T.Yu., Aseev V.Yu., Bobrakov F.Yu. Assessment of Constitutional Base of Agro-Grey Soil Fertility. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2021;1:57–61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/57-61>
6. Naumchenko E.T., Banetskaya E.V. Assessment of Changes in the Level of Soil Fertility and Productivity of Agroecosystem in Conditions of Long-Term use of Fertilizers. *Plodorodie*. 2023;1(130):39–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.130.09>
7. Ushakov R.N., Ushakova T.Yu., Ruchkina A.V., Abdulazyanova K.V., Bobrakov F.Yu. Assessment and Optimization of Agricultural Gray Soil Fertility by Methods of Multidimensional Statistical Analysis. *Agrohimiya*. 2022;12:69–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0002188122120134>
8. Vasyukov P.P., Lesovaya G.M., Chuvarleeva G.V., Mnatsakanyan A.A., Bykov O.B., Muhina M.T. Evaluation of Leached Chernozem Fertility Changes in Krasnodar Krai as a Function of Tillage Systems. *Plodorodie*. 2018;3(102):17–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.102.06>
9. Gumbarov A.D., Dolobeshkin E.V. Estimation of the Initial Agrochemical Index of Farmland Fertility by Average Weighted Integral Indices. *New Technologies*. 2019;2(48):204–216. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10220>
10. Zaharov V.L., Zubkova T.V., Shchuchka R.V., Gogmachadze G.D., Vinogradov D.V. [Agroecological Assessment of the Degree of Degradation of Meadow-Chernozem Soil in Apple Orchards on the Example of the Federal State Unitary Enterprise “Michurinskoye” of the Tambov Region]. *AGROECOINFO*. 2023;3. (In Russ.) Available at: https://www.agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2023/st_316_annot.html (accessed 25.04.2024).
11. Ushakov R.N., Ruchkina A.V., Elizarov A.O. On the Issue of Information Management of Soil Fertility. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2021;13(3):85–92. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **TKEEGZ**
12. Bunin A.A., Lisovskaia Yu.S., Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Shostak M.M. Agroecological Assessment of Agrarian Land use as a Basis to Increase its Sustainability. *Bulletin of KSAU*. 2021;4(169):80–86. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Milyutkin V.A., Kanaev M.A. [Technical Means of Soil Fertility Monitoring and Effectiveness of Differentiated Soil Fertilization under the Conditions of Precise Farming]. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2017;2(64):92–95. (In Russ.) EDN: **YMXGUJ**
14. Utkin A.A. Monitoring of Fertility and Ecotoxicological Condition of Reference Sites of Sod-Podzolic Soils of the Ivanovo Region. *Agrohimiya*. 2023;4:19–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0002188123040130>
15. Voloshenko I.V. Geoecological Assessment of Treated Soils. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2023;4:32–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17513/use.38021>

16. Aleksahin R.M. Radioactive Contamination as a Type of Soil Degradation. *Eurasian Soil Science*. 2009;12:1487–1498. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [KYGCWP](#)
17. Okunev G.A., Astafev V.L., Kuznetsov N.A. The Influence of Compacting Effect on the Soil in the Implementation of Energy-Saving Technologie. *APK Rossii*. 2017;24(5):1188–1194. (In Russ.) EDN: [ZXVRFD](#)
18. Dzhabborov N.I., Fedkin D.S., Mihajlov A.S. [Obosnovanie Sistemy Tekhnologicheskikh Processov Vosstanovleniya Neobrabatyvaemykh Zemel' v Usloviyah Povyshennogo Uvlazhneniya]. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2014;5(10):66–68. (In Russ.) EDN: [TAQOXH](#)
19. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Fedkin D.S. Agroecological Principles of Zonal Soil Tillage System Development. *Regionalnaya Ekologiya*. 2015;5(40):23–27. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [VDWGMZ](#)
20. Derzhavin L.M., Fried A.S. [On Complex Assessment of Fertility of Arable Lands]. *Agrochemistry*. 2001;9:5–12. (In Russ.) EDN: [VLZVGZ](#)
21. Maksimov D.A., Valkama E., Minin V.B., Ranta-Korhonen T., Zakharov A.M. Organic Project: Early Results. *AgroEcoEngineering*. 2020;4(105):101–113 (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [FEVOAU](#)

Об авторах:

Джаббаров Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: [A-7780-2019](#), nozimjon-59@mail.ru

Мишанов Алексей Петрович, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9838-5508>, amishanov@mail.ru

Добринов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: [AAC-9655-2020](#), a.v.dobrinov@yandex.ru

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: [AAB-2078-2021](#), tbsap52@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Н. И. Джаббаров – научное руководство, формулирование концепции решения, моделирование процесса.

А. П. Мишанов – расчет и анализ показателей, формулировка выводов.

А. В. Добринов – анализ результатов исследования, составление структуры статьи.

А. П. Савельев – постановка задачи, анализ литературных источников.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 15.05.2024; поступила после рецензирования 12.07.2024;
принята к публикации 19.07.2024*

*About the authors:*

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: [A-7780-2019](#), nozimjon-59@mail.ru

Aleksei P. Mishanov, Senior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9838-5508>, amishanov@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: [AAC-9655-2020](#), a.v.dobrinov@yandex.ru

Anatoliy P. Savelyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: [AAB-2078-2021](#), tbsap52@mail.ru

Authors contribution:

N. I. Jabborov – scientific guidance, formulation of the solution concept, process modeling.

A. P. Mishanov – calculation and analysis of indicators, formulation of conclusions.

A. V. Dobrinov – analysis of the study results, compilation of the article structure.

A. P. Savelyev – problem statement, analysis of literary references.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 15.05.2024; revised 12.07.2024; accepted 19.07.2024



АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.436.323

doi: 10.15507/2658-4123.034.202403.424-443



Исследование характеристик впрыскивания и распыливания метанолсодержащего топлива в дизельном двигателе

В. А. Лиханов, О. П. Лопатин✉

Вятский государственный агротехнологический университет
(г. Киров, Российская Федерация)

✉ nirs_vsaa@mail.ru

Аннотация

Введение. Работа двигателя внутреннего сгорания с современными экологичными и высокоэкономичными характеристиками не представляется возможной без глубоких и доскональных исследований, связанных с применением новых видов топлив. Именно поэтому прогнозирование показателей впрыскивания и распыливания в дизеле, работающем на смесевом спиртосодержащем топливе, оказывающих прямое воздействие на процесс горения и образование токсичных компонентов и, как следствие, экономичность и экологичность, является актуальной научной задачей. **Цель исследования.** Разработать теоретическую основу для расчета характеристик впрыскивания и распыливания метанолсодержащего топлива в цилиндры дизельного двигателя, позволяющую оптимизировать его рабочий процесс.

Материалы и методы. Рассмотрены характеристики впрыскивания и распыливания спиртосодержащего топлива в дизельном двигателе, переоборудованном для работы на смесевом метанолсодержащем топливе. В качестве базовых материалов и методов были использованы известные зависимости А. С. Лышевского, достаточно достоверно отражающие процессы впрыскивания и распыливания в дизельных двигателях.

Результаты исследования. Углубленные исследования базовых принципов оценки показателей впрыскивания и распыливания штатного топлива позволили адаптировать их для топлив смесового метанолсодержащего состава и исследовать динамику изменения продолжительности и скорости впрыскивания, значения критерия Вебера, границ между участками развития струи, размера капель и угла распыливания.

Обсуждение и заключение. Разработана теоретическая основа для расчета характеристик впрыскивания и распыливания метанолсодержащего топлива, позволяющая оптимизировать работу дизельного двигателя на применяемом смесевом топливе и повышать, как следствие, его экономичность и экологичность. Представленная в числовом выражении информация об изменении границ участков развития струи, величины капель, угла конуса распыливания позволяет достаточно достоверно устанавливать основные параметры распыливания применяемых смесевых метанолсодержащих топлив, определять вектор оптимизации процессов смесеобразования и давать понимание перспективного направления при проектировании геометрии камер сгорания, впускных каналов и т. д.

© Лиханов В. А., Лопатин О. П., 2024



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



Ключевые слова: впрыскивание топлива, распыливание топлива, испарение топлива, метанол, дизельный двигатель, метанолсодержащее топливо

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование характеристик впрыскивания и распыливания метанолсодержащего топлива в дизельном двигателе // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 424–443. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.424-443>

Investigating the Characteristics of Injecting and Spraying Methanol-Containing Fuel in a Diesel Engine

V. A. Likhanov, O. P. Lopatin✉

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

✉ nirs_vsaa@mail.ru

Abstract

Introduction. The operation of eco friendly and high-efficiency internal combustion engines is not possible without deep and comprehensive study of using new types of fuels. That is why, forecasting the indicators of injecting and spraying in a diesel engine running on a mixed alcohol-containing fuel, which have a direct effect on the combustion and formation of toxic components and, as a result, on efficiency and eco friendliness, is an urgent scientific task.

Aim of the Study. The study is aimed at developing a theoretical basis for calculating the characteristics of injecting and spraying methanol-containing fuel into diesel engine cylinders that allows optimizing its processes.

Materials and Methods. There are considered the characteristics of injecting and spraying alcohol-containing fuel in a diesel engine modified to operate on a mixed methanol-containing fuel. There were used the well-known A.S. Lyshevsky dependencies, which fairly reliably reflect the processes of injecting and spraying in diesel engines.

Results. The in-depth studies of the basic principles for evaluating the indicators of injecting and spraying standard fuel made it possible to adapt them for fuels of mixed methanol-containing composition and to investigate the dynamics of changes in the duration and speed of injection, the Weber criterion values, the boundaries between the areas of fuel jet forming, droplet size and spraying angle.

Discussion and Conclusion. There has been developed a theoretical basis for calculating the characteristics of injecting and spraying methanol-containing fuel that makes it possible to optimize the operation of a diesel engine running on mixed fuel and, as a result, improve its efficiency and eco friendliness. The presented numerically information on the change in the boundaries of the fuel jet forming areas, the size of the droplets and the angle of the spraying cone allows us to reliably determine the basic parameters of spraying of the used mixed methanol-containing fuels, determine the vector of optimization of the mixing processes and gives insight into the promising directions in designing the geometry of combustion chambers, intake ducts, etc.

Keywords: fuel injection, fuel spraying, fuel evaporation, methanol, diesel engine, methanol-containing fuel

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

For citation: Likhanov V.A., Lopatin O.P. Investigating the Characteristics of Injecting and Spraying Methanol-Containing Fuel in a Diesel Engine. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):424–443. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.424-443>

Введение. В настоящее время – время глобального изменения климата, волатильности цен на энергоносители в первую очередь нефтяного происхождения, постоянно увеличивающегося экологического ущерба от их использования, не всегда стабильных производственных процессов и, как следствие, локального дефицита традиционных энергоносителей и истощения их запасов – мировое сообщество давно уже пришло к пониманию необходимости экономии энергоресурсов и интеграции в топливно-энергетической системе новых альтернативных источников энергии [1–3].

Поскольку в мире активно продолжается развитие автомобильной промышленности и связанных с ней инфраструктур, а с ростом числа автомобилей на душу населения растет и объем выбросов их отработавших газов (ОГ), то понятно, что для уменьшения выбросов в атмосферу токсичных веществ необходимо снижение токсичности ОГ автотранспортного комплекса [4–6]. Разумеется, что эти два основных тезиса (энергосбережение и уменьшение токсичных выбросов) заставляют ученых во всем мире искать пути решения вопросов и топливной экономичности, и снижения токсичности ОГ современных мобильных энергетических средств [7; 8]. Решение этого вопроса невозможно без улучшения качества применяемого моторного топлива, а еще лучше – применения новых альтернативных топлив, отвечающих этим требованиям [9; 10].

Анализируя исследования отечественных и зарубежных ученых, можно выделить три возможных этапа в развитии перехода на новые альтернативные виды энергоносителей [11–13]. Первый этап включает в себя применение кроме базового традиционного нефтяного топлива различных присадок, спиртов, растительных масел, смесей, природного и сжиженного газов, добавок и прочих вариантов и комбинаций топлив, что частично решает некоторые проблемы как в плане экономии энергоресурсов, так и в отношении снижения токсичности выбросов ОГ [14–16]. Считаем, что в настоящее время в мировом двигателестроении этот этап уже наступил и получает достаточно активное развитие. Предполагаем, что на втором этапе наступит развитие использования синтетических энергоносителей, получаемых не только из углеводородного сырья, но из различных отходов. Третий этап должен представлять автотранспорт, например, на водороде либо атомной энергии [17; 18]. При этом отмечаем, что использование электроэнергии в мобильных энергетических средствах при рассмотрении этих условных этапов развития применения новых энергоносителей было отнесено нами в отдельный, самостоятельный, параллельно идущий с применением топливных энергоресурсов этап, достаточно активно развивающийся и вносящий существенный вклад в совершенствование инженерных технологий и систем в двигателестроении [19–21].

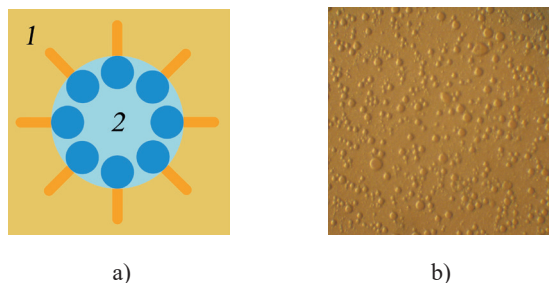
После анализа этапов развития применения новых энергоносителей отметим, что на сегодняшний день ускоренный переход ко второму либо к третьему условному этапам развития мало очевиден, поскольку в мировом сообществе сложились устоявшиеся традиции, созданы огромные производства и логистические связи, а переход требует необходимости серьезных капиталовложений не только для проведения научно-исследовательских работ, но и для создания соответствующей инфраструктуры, новых производств и модернизации существующих,

изменения логистических подходов и т. д. [22; 23]. Поэтому более очевидным решением по энергосбережению и снижению выбросов в окружающую среду от автотранспортного комплекса на сегодняшний день является выполнение поставленных задач в формате первого этапа. Таким приемлемым вариантом в этом формате может быть работа дизельного двигателя (ДД) на смесевых спиртосодержащих топливах, например, на метаноле (метиловом спирте – CH_3OH), для производства которого в промышленных масштабах имеются достаточные сырьевые ресурсы и мощности [24–26].

Однако разработка двигателя с минимальным количеством получаемых токсичных веществ и одновременно с высокоэкономичными характеристиками не представляется возможным без связанных с ним глубоких и доскональных исследований, поэтому прогнозирование характеристик впрыскивания и распыливания смесевое метанолсодержащего топлива (МСТ) в ДД, оказывающих прямое воздействие на экономичность и экологичность двигателя внутреннего сгорания (ДВС), является актуальной научной задачей [27–29].

Цель исследования – разработать теоретическую основу для расчета характеристик впрыскивания и распыливания метанолсодержащего топлива в цилиндры дизельного двигателя, позволяющую оптимизировать его рабочий процесс.

Обзор литературы. Метанолсодержащее топливо представляет собой эмульсию обратного типа, где дисперсионной средой является углеводородное дизельное топливо, а дисперсная фаза состоит из полярных жидкостей метанола и воды (рис. 1).



Р и с. 1. а) схематичное изображение; б) вид под микроскопом МСТ при 100-кратном увеличении
1 – Дизельное топливо (ДТ); 2 – Метанол и вода

Fig. 1. a) schematic image; b) microscopic view of a mixed methanol-containing fuel at 100x magnification
1 – Diesel fuel; 2 – Methanol and water

Источник: составлено по результатам исследований [27; 29].

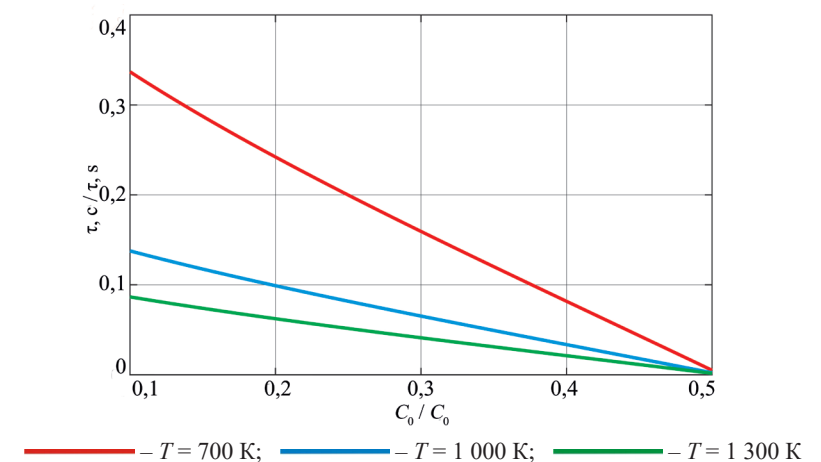
Source: is compiled by the authors based on the results of the studies [27; 29].

При горении МСТ дисперсная фаза, состоящая из метанола и воды, испаряется и превращается в пузырьки пара, взрывающиеся внутри поверхности дисперсионной среды, состоящей из дизельного топлива (ДТ). МСТ рассеивается на маленькие капельки и эффективно перемешивается с воздухом, что обеспечивает необходимое качество смесеобразования в камере сгорания (КС) ДД [27; 29; 30].

Исследования [31–33] подтверждают, что наличие паров воды благоприятно сказывается на полном выгорании топливовоздушной смеси и, следовательно, положительно влияет на экологическую составляющую от сгорания углеводородного топлива. По мнению авторов [31–33], эмульсионное топливо перед сгоранием должно проходить предварительную подготовку, заключающуюся в переводе его дисперсной фазы из жидкого состояния в парообразное.

Поскольку МСТ, как и водотопливная эмульсия (ВТЭ), представляет собой дисперсную систему, состоящую из нескольких близких по свойствам компонентов, где основные процессы связаны с получением эмульсии, динамикой разогрева, испарением капель, горением, можно считать обе системы развивающимися по одному типу. Следовательно, можно с большой долей вероятности рассмотреть физическую интерпретацию динамики разогрева и испарения капли МСТ на примере ВТЭ.

Учитывая влияние на динамику испарения периода пульсаций таких параметров, как дисперсность и размер капель, концентрация воды в составе эмульсии, процесс испарения перед воспламенением капли ВТЭ выглядит весьма непросто [31–33]. Вместе с тем пульсирующее поведение капли ВТЭ при испарении вызывает у ученых наибольший интерес, поскольку при решении задач моделирования необходимо учитывать достаточно медленный процесс накопления в объеме капли пара, что в свою очередь требует рассмотрения задачи в квазистационарной постановке. Основной целью при выполнении вычислений является изучение изменения температурных характеристик капли, воды и пара в динамике, а характеристики периода пульсации от концентрации воды в эмульсии (рис. 2), температуры среды (рис. 3), начального размера капли (рис. 4) и размеров глобул воды (рис. 5) можно определить с помощью численного моделирования релаксационных колебаний поверхности капли ВТЭ [31].

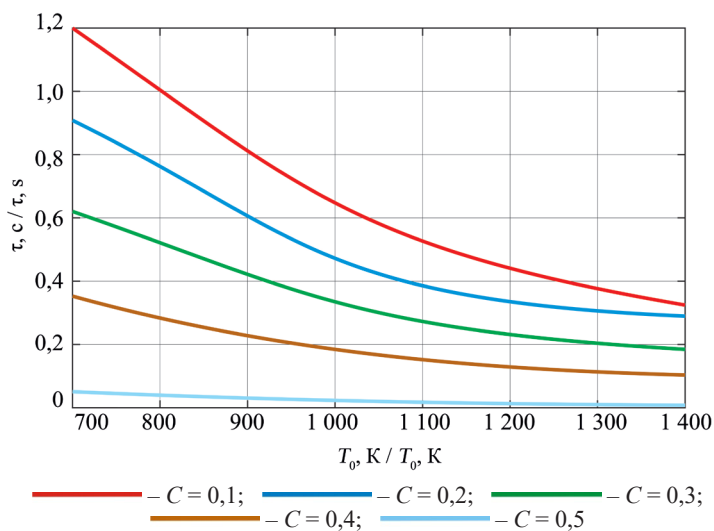


Р и с. 2. Зависимость времени периода пульсации от начальной концентрации
F i g. 2. Dependence of the pulsation period time on the initial concentration

Источник: рисунки 2–5, 7–12 составлены авторами статьи.

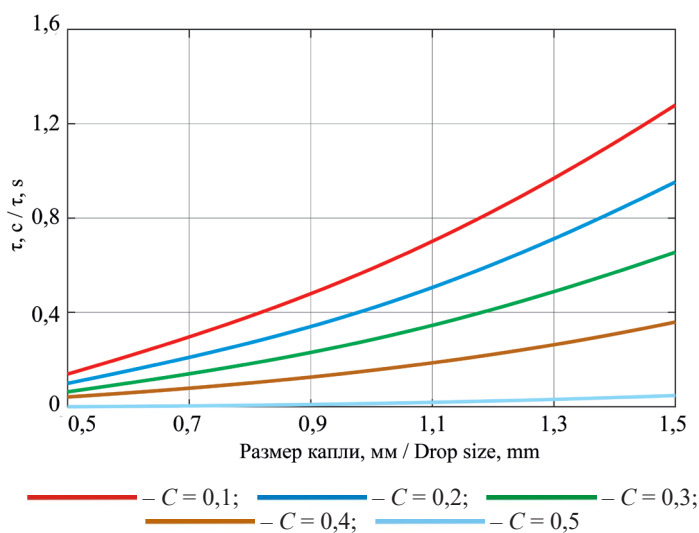
Source: diagrams 2–5, 7–12 are drawn by the authors of the article.

Увеличение концентрации снижает период пульсации, поскольку среднее расстояние между малыми концентрациями глобул воды уменьшается, а увеличивающиеся паровые оболочки требуют меньше времени на рост до соприкосновения.



Р и с. 3. Зависимость времени периода пульсации от температуры среды

F i g. 3. Dependence of the pulsation period time on the ambient temperature

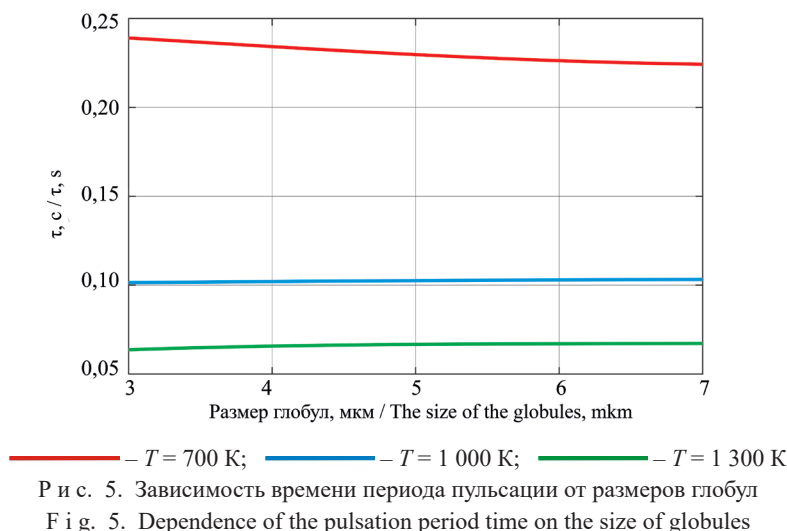


Р и с. 4. Зависимость времени периода пульсации от начального размера капли

F i g. 4. Dependence of the pulsation period time on the initial drop size

Рост температуры увеличивает поток подводимого тепла, что уменьшает период пульсации, интенсифицирует процесс кипения, при этом увеличивается скорость роста паровых оболочек до состояния плотной упаковки.

Большие размеры капли требуют больше тепла для разогрева, следовательно, рост размера капли увеличивает период пульсации, а фиксированные температуры внешней среды требуют больше времени для нарушения сплошности капли.



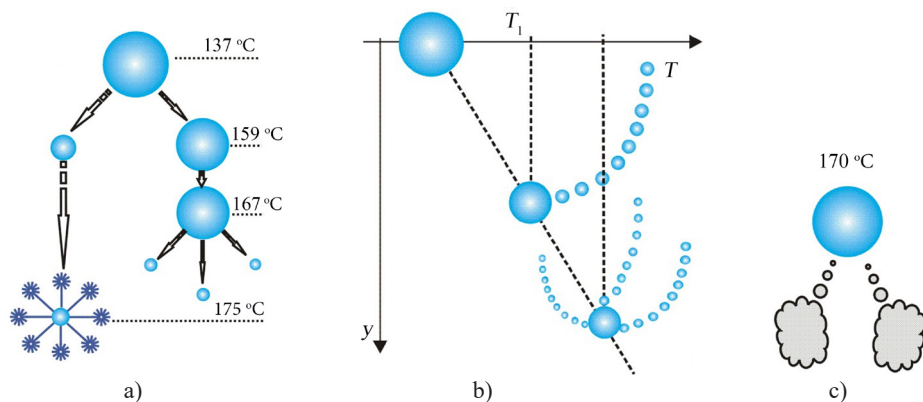
При малых температурах увеличение радиуса глобул воды оказывает незначительное влияние на период пульсации, поскольку требуется больше тепла на прогрев и кипение самих глобул, а увеличение температуры вызывает небольшое увеличение периода пульсаций вследствие более быстрого достижения состояния плотной упаковки.

В результате анализа рассмотренных выше исследований динамики пульсационного режима испарения капли можно констатировать закономерности периодически повторяющегося процесса достаточно спокойного накопления пара, достижения предельно допустимого количества в объеме капли ВТЭ с последующим быстрым выбросом. Периодичность этих процессов доказывается восстановлением формы капли после ее диспергирования. Таким образом, проведенные авторами исследования [31–33] достаточно полно описывают основные принципы существования периода пульсации, ее зависимость от свойств эмульсии и подтверждают «тормозящие» свойства воды в жидком виде.

Рассмотренные разнообразные механизмы испарения капли, горячей в открытой атмосфере, сводятся к двум группам: к так называемым микровзрывам, то есть к неоднократному дроблению капли эмульсии в результате вскипания внутрифазных водных включений, достигших температуры перегрева, либо к модели испарения капли в отсутствие интенсивной внутренней циркуляции, когда скорость фракционного испарения каждого компонента определяется его массовой долей [34].

Авторы в работе [35] показали, что замедление испаряемости топлива улучшает эмульгирование за счет эффекта вторичного измельчения, вызываемого микровзрывами.

Для проверки предлагаемой физической модели микровзрыва А. Я. Исаков [32] на разработанном им специальном экспериментальном оборудовании установил три варианта вскипания капель (рис. 6).



Р и с. 6. Схемы разложения капель воды в масле

- а) капля распадается на два фрагмента, каждый из которых впоследствии дробится на более мелкие, либо взрывается, переходя в парообразное состояние;
- б) кипение капель с дальнейшей генерацией цепочек паровых полостей;
- с) капли взрываются и превращаются в пар

F i g. 6 . The schemes of decomposing water droplets in oil

- a) the drop decomposes into two fragments, each of which is subsequently decomposes into smaller ones, or explodes, turning into a vapor state;
- b) boiling of droplets with further generation of chains of vapor cavities;
- c) the droplets explode and turn into steam

Источник: составлено по результатам исследований [32].

Source: the diagram is based on the study results [32].

Как и предполагалось ранее [32–34], при нагревании капля воды в топливной среде определяющим критерием механизма образования конкурентной фазы является газосодержание – количество и распределение по размерам ядер конкурентной фазы (пар – вода).

Полученные теоретические и экспериментальные результаты показывают, что при рассмотрении особенностей микровзрыва капля эмульгированного топлива образование конкурентной паровой фазы при перегреве является одним из основных положительных моментов.

Представленный литературный обзор показывает обоснованность рассмотренной физической модели и доказывает возможность оптимизации ВТЭ изменением температуры перегрева капель распыленного топлива. Таким образом, ВТЭ – это эмульсии обратного типа и по определению схожие с МСТ, следовательно изложенные выше результаты исследований можно с высокой долей вероятности перенести на МСТ, дополнив определенными уточнениями.

Резюмируя, следует отметить, что с помощью рассмотренных выше исследований достаточно сложно провести оптимизацию параметров распыливания МСТ для конкретного ДД. При этом исследования А. С. Лышевского и Н. Ф. Разлейцева позволяют применять предложенные ими критериальные зависимости¹ для приближенных расчетов характеристик топливного факела в различных условиях впрыскивания, что достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными при исследовании впрыскивания штатного ДТ. Однако с помощью рассмотренных исследований нет возможности достаточно точно определить основные параметры распыливания МСТ, поскольку методики не учитывают изменения плотности, динамической вязкости и поверхностного натяжения МСТ при прочих равных условиях.

Материалы и методы. Рассмотрим характеристики впрыскивания и распыливания спиртосодержащего топлива для ДД 4Ч 11,0/12,5, переоборудованного для работы на МСТ [27]. В указанном ДД осуществляется объемно-плечное смешение, зависящее от скорости истечения топлива из сопловых отверстий, скорости продвижения переднего фронта факела и глубины его проникновения в КС (дальнобойности), угла конуса факела, распределения топлива в объеме факела, мелкости и однородности его распыливания [27; 29].

Развиваясь, топливный факел условно может проходить три участка (рис. 7) закономерности распада и движения струи: сплошной, начальный и основной. Сплошной участок характеризуется скоростью истечения жидкости из сопла. При работе на ДТ его длина составляет доли мм, поскольку практически сразу после выхода струи из сопла начинается ее распад. Следовательно, при работе на МСТ учет этого участка не изменит общую картину закономерностей развития факела, поэтому им можно пренебречь. Рассматривая закономерности начального и основного участков развития факела, позволим себе опереться на исследования А. С. Лышевского и Н. Ф. Разлейцева², в которых авторы, руководствуясь свойствами затопленной струи несжимаемой жидкости и большой концентрацией капель на начальном участке, сделали предположение об объемном развитии факела на начальном участке и струйном – на основном (рис. 7).

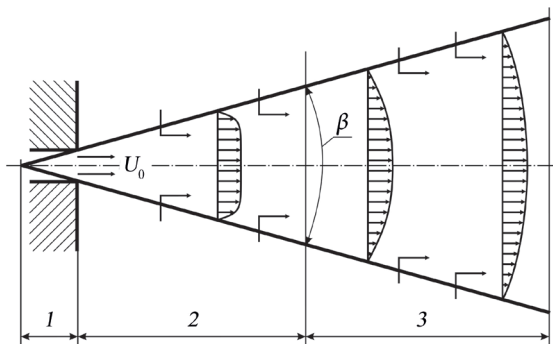
В результате турбулентного обмена импульсами между факелом и газовой воздушной смесью частицы топлива, попадающие в окружающую среду, передают ей количество движения, замещаясь при этом поступающими из окружающей среды частицами, которые не имеют продольной скорости и уменьшают ее в топливном факеле.

Для учета особенностей процесса сгорания МСТ дополним основополагающие теоретические соотношения, основанные на законах химической кинетики при сгорании ДТ, соответствующими эмпирическими коэффициентами, учитывающими эти особенности. Поскольку на рассматриваемом ДД нами был проведен весь цикл экспериментальных испытаний при работе его на МСТ (состав МСТ: 25 % – метанол; 0,5 % – сукцинимид С-5А; 7 % – вода; 67,5 % – ДТ) [27],

¹ Лышевский А. С. Распыливание топлива в судовых дизелях. Л. : Судостроение, 1971. 248 с.; Разлейцев Н. Ф. Моделирование и оптимизация процессов сгорания в дизелях : моногр. Харьков, 1980. 169 с. URL: <https://reallib.org/reader?file=477321> (дата обращения: 14.02.2024).

² Там же.

то значения этих коэффициентов получаем путем идентификации математической модели процесса сгорания МСТ по экспериментальным характеристикам тепловыделения [27; 29].



Р и с. 7. Схема динамики топливного факела в неподвижной среде
1 – Сплошной участок; 2 – Начальный участок; 3 – Основной участок

F i g. 7. A diagram of the fuel spray dynamics in a stationary medium
1 – A solid section; 2 – The initial section;
3 – The main section

При разработке модели впрыскивания и распыливания МСТ за основу были взяты зависимости, разработанные А. С. Лышевским (уточненные Н. Ф. Разлейцевым) для быстроходных форсированных ДД. Нами была проведена оценка возможности использования критериальных зависимостей для определения дальности L , угла раскрытия топливной струи β , мелкости распыливания d_n применительно к МСТ.

Результаты исследования. Основываясь на данных проведенного анализа исследований внутрицилиндровых процессов ДД, используем научные результаты, полученные в камерах распыливания при больших противодавлениях³. Модель, определяющая характеристики процессов впрыскивания и распыливания МСТ в ДД, будет включать в себя и данные этих научных изысканий [29].

Так, для определения характеристики сил инерции относительно поверхностного натяжения используем соотношение Вебера:

$$W_e = U_{av} \cdot d_n \cdot \frac{\rho_f}{\sigma_f},$$

где d_n – диаметр сопла, мм; ρ_f – плотность, кг/м³; σ_f – поверхностное натяжение топлива, Н/м; U_{av} – средняя для всего периода впрыска скорость истечения топлива из распылителя, м/с:

$$U_{av} = B_c / (k_n \cdot S_n \cdot \rho_f \cdot \tau_f),$$

где B_c – цикловая порция топлива, кг/цикл; k_n – коэффициент расхода, определяющий конструктивные особенности распылителя; S_n – суммарная площадь сопловых отверстий, м²; τ_f – продолжительность впрыска, с.

³ Лышевский А. С. Распыливание топлива в судовых дизелях.

Для определения показателя, обуславливающего соотношение сил инерции и вязкости, а также поверхностного натяжения, используем следующее выражение:

$$N = \mu_f^2 / (\rho_f \cdot d_n \cdot \sigma_f),$$

где μ_f – динамическая вязкость топлива, Па·с.

Формула, определяющая расстояние между начальным и основным отрезками при распространении факела:

$$L_b = C_e \cdot d_n \cdot W_e^{0,25} \cdot N^{0,4} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{-0,6},$$

где C_e – эмпирический коэффициент; ρ_a – плотность воздуха в КС, кг/м³.

Расстояние, пройденное «верхушкой» факела по направлению осевой линии и характеризуемое основным отрезком:

$$L_o = \sqrt{K_n} \cdot \sqrt{\tau_f},$$

где K_n – характеристика особенностей конструкции и регулировок топливной аппаратуры.

Величина для определения осредненного размера частиц МСТ:

$$d_g = z_n \cdot d_n \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \cdot W_e \right)^{-0,266} \cdot N^{0,0733},$$

где z_n – коэффициент, определяющий конструкцию форсунки.

Размер угла конуса при распыливании МСТ:

$$\beta = 2 \cdot \arctg \left(x_n \cdot W_e^{0,32} \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_f}} \cdot N^{-0,07} \right),$$

где x_n – коэффициент, определяющий конструкцию форсунки импульсного впрыскивания.

Характеристики топлив, которые использовались в экспериментальных испытаниях ДД [27] и расчетных исследованиях представлены в таблице.

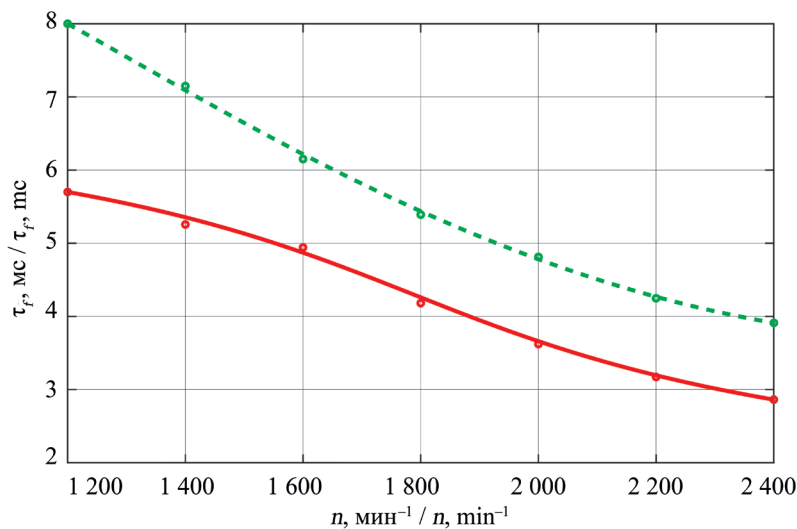
Т а б л и ц а

T a b l e

Характеристики топлива
Fuel Characteristics

Топливо / Fuel	Цикловая подача, q_c , г/цикл / Cyclic feed, q_c , g/cycle	Плотность топлива, ρ_f , кг/м ³ / Fuel density, ρ_f , kg/m ³	Поверхностное натяжение, σ_f , Н/м / Surface tension, σ_f , N/m	Динамическая вязкость μ_f , Па·с / Dynamic viscosity μ_f , Pa·s
ДТ / Diesel fuel	0,05	831	0,0280	0,0038
МСТ / Mixed methanol-containing fuel	0,07	837	0,0304	0,0029

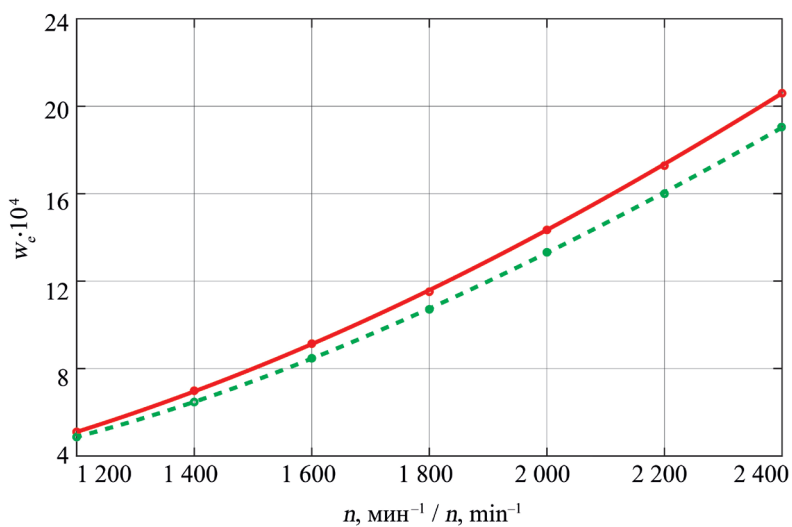
Результаты расчетных исследований характеристик впрыскивания и распыливания МСТ в ДД 4Ч 11,0/12,5 представлены на рисунках 8–12.



— ДТ / Diesel fuel;
 - - - МСТ / Mixed methanol-containing fuel

Р и с. 8. Продолжительность впрыскивания

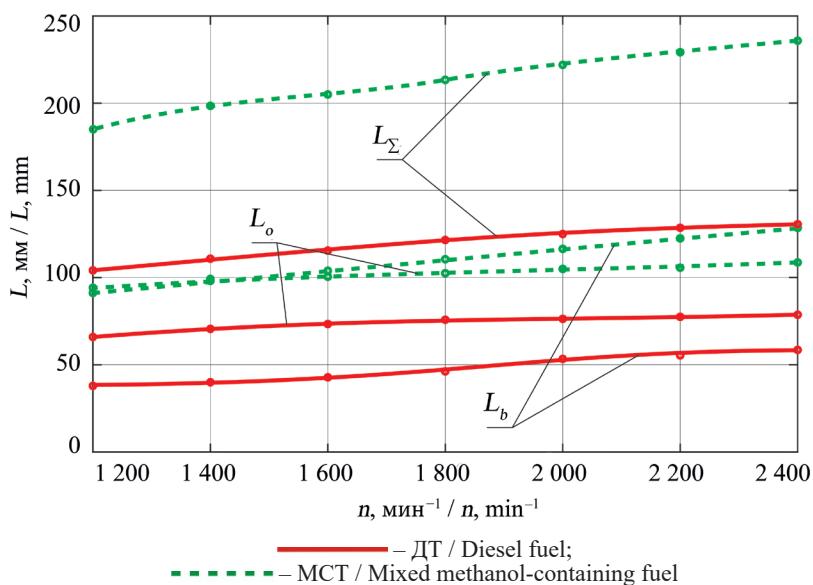
F i g. 8. Injection duration



— ДТ / Diesel fuel;
 - - - МСТ / Mixed methanol-containing fuel

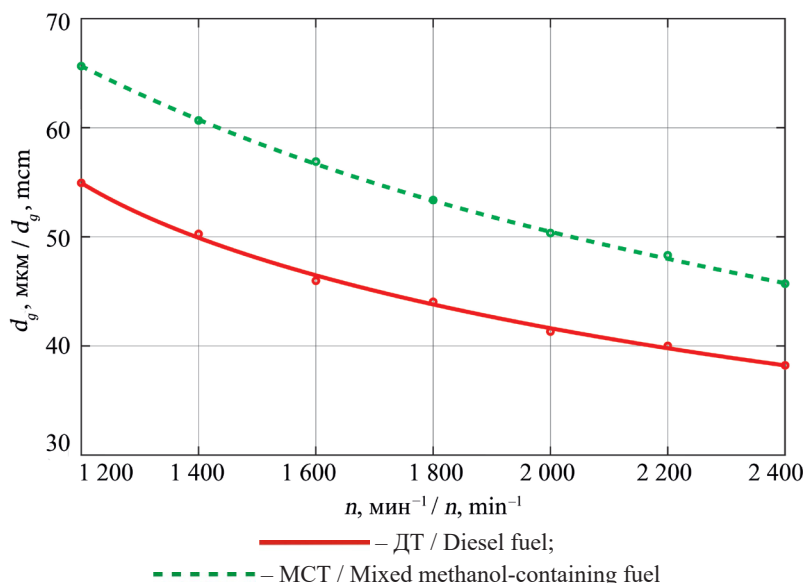
Р и с. 9. Критерий Вебера

F i g. 9. The Weber Criterion



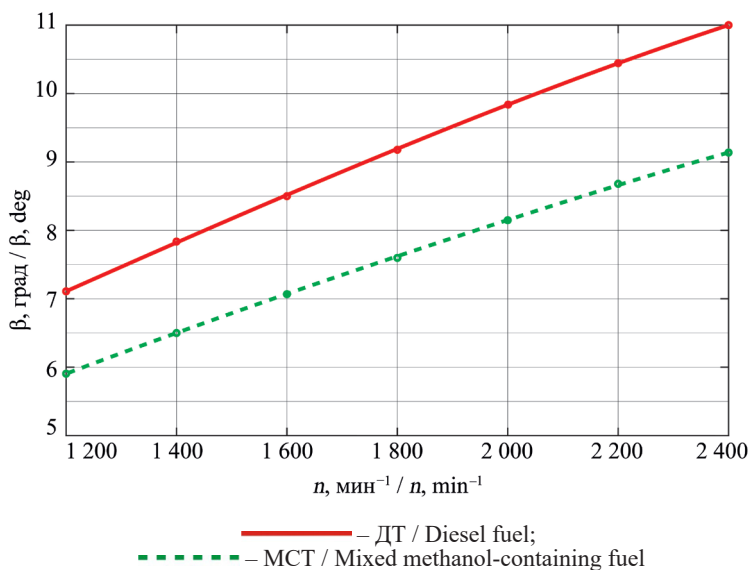
Р и с. 10. Границы между участками развития струи

F i g. 10. Boundaries between areas of fuel jet forming



Р и с. 11. Средний диаметр капель

F i g. 11. The average diameter of the droplets



Р и с. 12. Угол распыливания

F i g. 12. Spraying angle

Обсуждение и заключение. Продолжительность впрыскивания обоих видов топлива (рис. 8), характеризуемая профилем кулачка топливного насоса высокого давления, с увеличением частоты вращения классически снижается. Здесь следует пояснить, что при работе на МСТ, в отличие от ДТ, рост продолжительности впрыскивания во всем диапазоне исследования частот вращения вызван большей цикловой подачей МСТ. Увеличение же частоты вращения приводит к росту значений скорости впрыскивания, критерия Вебера (рис. 9), расстояния между участками развития струи (рис. 10) на обоих исследуемых топливах. Здесь также следует подчеркнуть, что значение динамической вязкости зависит в определяющей степени от вида применяемого топлива (отличие может быть достаточно существенным, в нашем случае 23,7 %), чего нельзя сказать о поверхностном натяжении, максимальная величина изменения которого составляет 7,9 %. Таким образом, основными факторами, оказывающими влияние на изменение характера кривых, остаются динамическая вязкость и продолжительность впрыскивания, напрямую зависящая от цикловой подачи, которую мы были вынуждены увеличивать для поддержания требуемых мощностных параметров при снятии характеристик во время стендовых испытаний ДД [27; 29].

Анализируя результаты полученных теоретических зависимостей, можно констатировать, что при переходе с ДТ на МСТ вследствие изменения динамической вязкости топлива (уменьшение составляет 23,7 % – с 0,0038 до 0,0029 Па·с) происходит рост суммарной дальности факела. Это приводит к увеличению (более чем в два раза) расстояния между начальным и основным участками развития факела, при этом значительно увеличивается путь, проходимый вершиной факела на основном участке. В результате уменьшается время достижения струей МСТ стенки КС.

На изменение средней величины размера капель (рис. 11) основное влияние оказывают плотность, вязкость и поверхностное натяжение применяемого топлива. Впрыскивание в КС дизельного двигателя МСТ с большим поверхностным натяжением по отношению к ДТ уменьшает угол рассеивания топливной струи и ее боковую поверхность (рис. 12). С одной стороны это приведет к меньшей доле топлива, испарившегося за период задержки воспламенения, а с другой – увеличит количество топлива, сгорающего в кинетической и диффузионной фазах, где открываются возможности для повышения эффективности горения за счет содержания кислорода в молекуле метанола, что позволяет насыщать зону пламени дополнительным кислородом, вследствие чего повышается доля паров воды и снижается концентрация продуктов сгорания, что в свою очередь не может не обладать существенным экологическим эффектом.

В результате проведенных исследований авторы пришли к следующим выводам:

- разработана теоретическая основа для расчета характеристик впрыскивания и распыливания метанолсодержащего топлива в цилиндры дизельного двигателя, позволяющая оптимизировать его рабочий процесс;

- установлено, что по результатам расчета характеристик впрыскивания и распыливания МСТ для ДД 4Ч 11,0/12,5 на номинальной частоте вращения $2\,200\text{ мин}^{-1}$ при переходе с дизельного топлива на МСТ происходит увеличение продолжительности впрыскивания с 3,3 до 4,3 мс, что составляет 23,3 %; уменьшения критерия Вебера с $17,2 \cdot 10^4$ до $16,0 \cdot 10^4$, что составляет 7,0 %; рост среднего диаметра капель с 40 до 48 мкм, что составляет 16,7 %; уменьшение угла распыливания с $10,5^\circ$ до $8,7^\circ$, что составляет 17,1 %;

- получено представление в числовом выражении информации об изменении границ участков развития струи, величины капель, угла конуса распыливания, что позволяет не допустить возможный отскок газовойоздушной смеси используемого МСТ на «недостаточно прогретую» поверхность днища головки цилиндра, оптимизировать рабочий процесс и понять перспективу направления его проектирования;

- установлена возможность определять основные параметры распыливания применяемых смесевых спиртосодержащих топлив на этапе проектирования рабочего процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh G., Wani M. F., Wani M. M. Fuel Energy Saving in SI Engine Using Graphene and Graphite as Nano-Additives: a Comparative Study // *Applied Nanoscience*. 2022. Vol. 12, No. 5. P. 1387–1401. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02298-1>

2. Balchugov A., Babenkov A. Annual Consumption of Fuel and Energy Resources as an Indicator of the Efficiency of Energy Saving Technologies // *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*. 2022. No. 1. P. 7–8. <https://doi.org/10.36629/2686-9896-2022-1-7-8>

3. Enhancing the Fuel Saving and Emissions Reduction of Light-Duty Vehicle by a New Design of Air Conditioning Worked by Solar Energy / W. K. Alani [et al.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. Vol. 30. Article no. 101798. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101798>

4. Ultrasonic Unit for Reducing the Toxicity of Diesel Vehicle Exhaust Gases / A. Kadyrov [et al.] // *Komunikacie*. 2022. Vol. 24, No. 3. P. B189–B198. <https://doi.org/10.26552/com.c.2022.3.b189-b198>



5. Abbas M.S. Comprehensive Analysis of Engine Power, Combustion Parameters, and Emissions of a B30 Biodiesel-Powered IC Engine // CFD Letters. 2022. Vol. 14, No. 7. P. 87–99. <https://doi.org/10.37934/cfdl.14.7.8799>
6. Biodiesel Fueled Turbocharged Direct-Injection Engine: Influence of Compression Ratio on Engine Performance and Emission Characteristics / S. Chakraborty [et al.] // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2022. Vol. 23, Issue 7. P. 119–130. <https://doi.org/10.1615/interjenercleanenv.2022039720>
7. Barman J., Deshmukh D. Effect of Fuel Reactivity on Engine Performance and Exhaust Gas Emissions in a Diesel Engine // SAE International Journal of Fuels and Lubricants. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 155–167. <https://doi.org/10.4271/04-16-02-0012>
8. Modelling the End-Use Performance of Alternative Fuel Properties in Flex-Fuel Vehicles / Yu. Kroyan [et al.] // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 269. Article no. 116080. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116080>
9. Impact of Energy Production Mix on Alternative Fuel Vehicle Adoption in Korea / S. Moon [et al.] // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2022. Vol. 105. Article no. 103219. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103219>
10. 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. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.373-389>
11. Cihat Onat N. How to Compare Sustainability Impacts of Alternative Fuel Vehicles? // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2022. Vol. 102. Article no. 103129. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103129>
12. An Overview of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers as Alternative Fuel for Compression Ignition Engines / J. Liu [et al.] // Fuel. 2022. Vol. 318. Article no. 123582. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123582>
13. Review on Exhaust Emissions of CI Engine Using Ethanol as an Alternative Fuel / Ja. A. John [et al.] // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 69. P. 286–290. <https://doi.org/10.1016/j.matp.2022.08.536>
14. Dolcy K., Townsend T. Challenges to Alternative Fuel Vehicle Usage in Trinidad // West Indian Journal of Engineering. 2022. Vol. 44, No. 2. P. 20–28. <https://doi.org/10.47412/yjdc3406>
15. Bitire S. O., Jen T. Ch. The Potential of Parsley Biodiesel as an Alternative Fuel in Diesel Engines // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 917. P. 258–265. <https://doi.org/10.4028/p-3p823o>
16. Factors Influencing Alternative Fuel Adoption Decisions in Heavy-Duty Vehicle Fleets / Y. Bae [et al.] // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2022. Vol. 102. Article no. 103150. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103150>
17. Qazi U. Ya. Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications; Challenges and Expected Opportunities // Energies. 2022. Vol. 15, Issue 13. Article no. 4741. <https://doi.org/10.3390/en15134741>
18. Nabi Md. N., Hussam W. K., Muyeen S. M. Improved Engine Performance and Significantly Reduced Greenhouse Gas Emissions by Fumigating Hydrogen in a Diesel Engine // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.241>
19. Maheswari K. L., Kavitha S., Kathiresh M. Introduction to Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles // EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. 2022. P. 1–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85424-9_1
20. Cai Sh., Kirtley Ja. L., Lee Ch. H. T. Critical Review of Direct-Drive Electrical Machine Systems for Electric and Hybrid Electric Vehicles // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2022. Vol. 37, Issue 4. P. 2657–2668. <https://doi.org/10.1109/tec.2022.3197351>
21. A Study of Advanced Efficient Hybrid Electric Vehicles, Electric Propulsion and Energy Source / M. Y. Iqbal [et al.] // Journal of Power and Energy Engineering. 2022. Vol. 10, No. 7. P. 1–12. <https://doi.org/10.4236/jpee.2022.107001>
22. Analysis of Electric Vehicles with an Economic Perspective for the Future Electric Market / S.S. Reka [et al.] // Future Internet. 2022. Vol. 14, Issue 6. P. 172. <https://doi.org/10.3390/fi14060172>

23. Numerical Simulation of Methanol Crossover in Flowing Electrolyte-Direct Methanol Fuel Cell / Wu. Yujing [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 519. Article no. 230801. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230801>
24. Review on Technologies for Conversion of Natural Gas to Methanol / N. Salahudeen [et al.] // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022. Vol. 108. Article no. 104845. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104845>
25. Potential of Methanol Production from the Photoelectrochemical Reduction of CO₂ on rGO-CuO/Cu Composite / R. M. Shah [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 57. P. 1123–1126. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.495>
26. Direct Conversion of Methane to Methanol on Boron Nitride-Supported Copper Single Atoms / S. Wang [et al.] // *Nanoscale*. 2022. Issue 14. P. 5447–5453. <https://doi.org/10.1039/d1nr08466f>
27. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование токсичности дизельного двигателя при работе на различных альтернативных топливах // *Двигателестроение*. 2023. № 2 (292). С. 54–61. <https://doi.org/10.18698/jec.2023.2.54-61>
28. Vural E. The use of High Molecular Iso-Amyl Alcohol as an Alternative Fuel for Compression Ignition Engines // *Thermal Science*. 2022. Vol. 26, Issue 4. Part A. P. 2919–2927. <https://doi.org/10.2298/tsci2204919v>
29. Сгорание и тепловыделение в цилиндре тракторного дизеля при работе на метанолю-топливной эмульсии / В. А. Лиханов [и др.] // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 11. С. 14–19. EDN: WYQMWN
30. Лебедев О. Н. Некоторые особенности горения капель водотопливных эмульсий в дизелях // *Физика горения и взрыва*. 1978. № 2. С. 142–145. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/c80/c800d3515c77976fb0606f2bd008f778.pdf> (дата обращения: 14.02.2024).
31. Опятюк В. В. Каскадный механизм микровзрывов капли водо-топливной эмульсии // *Горение и плазмохимия*. 2015. Т. 13, № 1. С. 11–15. EDN: XGZVIE
32. Исаков А. Я., Деминов В. И. Физическая модель процессов, предшествующих воспламенению капель водотопливной эмульсии // *Физика горения и взрыва*. 1986. № 6. С. 15–20. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/943/943bc506db861aa9367fcc8be7272f61.pdf> (дата обращения: 14.02.2024).
33. Простов В. Н., Яковлев А. В., Гладких В. А. Воспламенение водно-топливных эмульсий // *Физика горения и взрыва*. 1986. № 5. С. 9–14. URL: <https://market.sibran.ru/upload/iblock/155/155055a676c5e0454563f41250cc406a.pdf> (дата обращения: 14.02.2024).
34. Ануфриев И. С. Исследование процессов горения жидких углеводородов при распылении струей перегретого водяного пара // *Тепловые процессы в технике*. 2019. Т. 11, № 4. С. 158–169. EDN: WDISAO
35. Law C. K., Lee C. H., Srinivasan N. Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion Droplets // *Combustion and Flame*. 1980. Vol. 37. P. 125–143. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90080-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90080-2)

REFERENCES

1. Singh G., Wani M.F., Wani M.M. Fuel Energy Saving in SI Engine Using Graphene and Graphite as Nano-Additives: a Comparative Study. *Applied Nanoscience*. 2022;12(5):1387–1401. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02298-1>
2. Balchugov A., Babenkov A. Annual Consumption of Fuel and Energy Resources as an Indicator of the Efficiency of Energy Saving Technologies. *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*. 2022;1:7–8. <https://doi.org/10.36629/2686-9896-2022-1-7-8>
3. Alani W.K., Zheng J., Fayad M.A., Lei L. Enhancing the Fuel Saving and Emissions Reduction of Light-Duty Vehicle by a New Design of Air Conditioning Worked by Solar Energy. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;30:101798. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101798>



4. Kadyrov A., Sarsembekov B., Ganyukov A., Suyunbaev S., Sinelnikov K. Ultrasonic Unit for Reducing the Toxicity of Diesel Vehicle Exhaust Gases. *Komunikacie*. 2022;24(3):B189–B198. <https://doi.org/10.26552/com.c.2022.3.b189-b198>
5. Abbas M.S. Comprehensive Analysis of Engine Power, Combustion Parameters, and Emissions of a B30 Biodiesel-Powered IC Engine. *CFD Letters*. 2022;14(7):87–99. <https://doi.org/10.37934/cfdl.14.7.8799>
6. Chakraborty S., Kolay A., Siddhanta S., Mitra S., Dev P., Mahanta A., et al. Biodiesel Fueled Turbocharged Direct-Injection Engine: Influence of Compression Ratio on Engine Performance and Emission Characteristics. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2022;23(7):119–130. <https://doi.org/10.1615/interjenercleanenv.2022039720>
7. Barman J., Deshmukh D. Effect of Fuel Reactivity on Engine Performance and Exhaust Gas Emissions in a Diesel Engine. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 2023;16(2):155–167. <https://doi.org/10.4271/04-16-02-0012>
8. Kroyan Yu., Wojcieszek M., Kaario O., Larri M. Modelling the End-Use Performance of Alternative Fuel Properties in Flex-Fuel Vehicles. *Energy Conversion and Management*. 2022;269:116080. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116080>
9. Moon S., Lee J., Choi H., Woo J. Impact of Energy Production Mix on Alternative Fuel Vehicle Adoption in Korea. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022;105:103219. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103219>
10. Likhanov V.A., Lopatin O.P. The use of Rapeseed Oil and Ethanol in a Diesel Engine. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):373–389. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.373-389>
11. Cihat Onat N. How to Compare Sustainability Impacts of Alternative Fuel Vehicles? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022;102:103129. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103129>
12. Liu J., Wang L., Wang P., Sun P., Liu H., Meng Z., et al. An Overview of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers as Alternative Fuel for Compression Ignition Engines. *Fuel*. 2022;318:123582. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123582>
13. John J.A., Shahinsha N.M., Singh K., Pant R. Review on Exhaust Emissions of CI Engine Using Ethanol as an Alternative Fuel. *Materials Today: Proceedings*. 2022;69:286–290. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.536>
14. Dolcy K., Townsend T. Challenges to Alternative Fuel Vehicle Usage in Trinidad. *West Indian Journal of Engineering*. 2022;44(2):20–28. <https://doi.org/10.47412/yjdc3406>
15. Bitire S.O., Jen T.Ch. The Potential of Parsley Biodiesel as an Alternative Fuel in Diesel Engines. *Key Engineering Materials*. 2022;917:258–265. <https://doi.org/10.4028/p-3p8230>
16. Bae Y., Mitra S.K., Rindt C.R., Ritchie S.G. Factors Influencing Alternative Fuel Adoption Decisions in Heavy-Duty Vehicle Fleets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022;102:103150. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103150>
17. Qazi U.Ya. Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications; Challenges and Expected Opportunities. *Energies*. 2022;15(13):4741. <https://doi.org/10.3390/en15134741>
18. Nabi Md.N., Hussam W.K., Muyeen S.M. Improved Engine Performance and Significantly Reduced Greenhouse Gas Emissions by Fumigating Hydrogen in a Diesel Engine. *Energy Reports*. 2022;8:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.241>
19. Maheswari K.L., Kathiresan M., Kavitha S. Introduction to Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles. *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. 2022:1–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85424-9_1
20. Cai Sh., Kirtley Ja.L., Lee Ch.H.T. Critical Review of Direct-Drive Electrical Machine Systems for Electric and Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022;37(4):2657–2668. <https://doi.org/10.1109/tec.2022.3197351>
21. Iqbal M.Y., Wang T., Li G., Chen D., Al-Nehari M.M. A Study of Advanced Efficient Hybrid Electric Vehicles, Electric Propulsion and Energy Source. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2022;10(7):1–12. <https://doi.org/10.4236/jpee.2022.107001>

22. Reka S.S., Venugopal P., Ravi V., Alhelou H.H., Al-Hinai A., Siano P. Analysis of Electric Vehicles with an Economic Perspective for the Future Electric Market. *Future Internet*. 2022;14(6):172. <https://doi.org/10.3390/fi14060172>
23. Yujing W., Hongxiu Z., Ao Z., Leqing Z. Numerical Simulation of Methanol Crossover in Flowing Electrolyte-Direct Methanol Fuel Cell. *Journal of Power Sources*. 2022;519:230801. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230801>
24. Salahudeen N., Rasheed A.A., Babalola A., Moses A.U. Review on Technologies for Conversion of Natural Gas to Methanol. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022;108:104845. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104845>
25. Shah R.M., Masdar M.S., Minggu L.J., Wong W.Y., Yunus R.M. Potential of Methanol Production from the Photoelectrochemical Reduction of CO₂ on rGO-CuO/Cu Composite. *Materials Today: Proceedings*. 2022;57:1123–1126. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.495>
26. Wang S., Xin Y., Yuan J., Wang L., Zhang W. Direct Conversion of Methane to Methanol on Boron Nitride-Supported Copper Single Atoms. *Nanoscale*. 2022;14:5447–5453. <https://doi.org/10.1039/d1nr08466f>
27. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Investigation of the Toxicity of a Diesel Engine when Running on Various Alternative Fuels. *Dvigatelistroyeniye*. 2023;2(292):54–61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18698/jec.2023.2.54-61>
28. Vural E. The use of High Molecular Iso-Amyl Alcohol as an Alternative Fuel for Compression Ignition Engines. *Thermal Science*. 2022;26(4A):2919–2927. <https://doi.org/10.2298/tsci2204919v>
29. Likhanov V.A., Lopatin O.P., Romanov S.A., Paturov A.V. Combustion and Heat Emission in the Cylinder of Tractor Diesel Engine Operating on Methanol-Fuel Emulsion. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;(11):14–19 (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WYQMWN
30. Lebedev O.N. [Some Features of the Combustion of Droplets of Water-Fuel Emulsions in Diesel Engines]. *Physics of Combustion and Explosion*. 1978;(2):142–145. (In Russ.) Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/c80/c800d3515c77976fb0606f2bd008f778.pdf> (accessed 14.02.2024).
31. Opyatyuk V.V. The Cascade Mechanism of Micro Implosions Drops of Water-Fuel Emulsion. *Combustion and Plasma Chemistry*. 2015;13(1):11–15. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XGZVIE
32. Isakov A.Ya., Deminov V.I. [A Physical Model of the Processes Preceding the Ignition of Droplets of a Water-Fuel Emulsion]. *Physics of Combustion and Explosion*. 1986;(6):15–20. (In Russ.) Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/943/943bc506db861aa9367fcc8be7272f61.pdf> (accessed 14.02.2024).
33. Prostov V.N., Yakovlev A.V., Gladkikh V.A. [Ignition of Water-Fuel Emulsions]. *Physics of Combustion and Explosion*. 1986;(5):9–14. (In Russ.) Available at: <https://market.sibran.ru/upload/iblock/155/155055a676c5e0454563f41250cc406a.pdf> (accessed 14.02.2024).
34. Anufriev I.S. Studying Combustion of Liquid Hydrocarbons While Spraying By the Superheated Water Steam Jet. *Thermal Processes in Engineering*. 2019;11(4):158–169. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WDISAO
35. Law C.K., Lee C.H., Srinivasan N. Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion Droplets. *Combustion and Flame*. 1980;37:125–143. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90080-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90080-2)

Об авторах:

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

Лопатин Олег Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов Вятского ГАТУ (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр., 133), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, 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 определения параметров впрыскивания и распыливания, редактирование текста, составление выводов и заключения.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 16.03.2024; поступила после рецензирования 17.05.2024;
принята к публикации 27.05.2024*

About the authors:

Vitaly A. Likhanov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Heat Engines Automobiles and Tractors, Vyatka State Technical University (133 Oktyabrsky Ave., Kirov 610017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-7176>, Researcher ID: AGN-7347-2022, lihanov.va@mail.ru

Oleg P. Lopatin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Heat Engines Automobiles and Tractors, Vyatka State Technical University (133 Oktyabrsky Ave., Kirov 610017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0806-6878>, Researcher ID: AAD-8374-2019, nirs_vsaa@mail.ru

Authors contribution:

V. A. Likhanov – 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 for determining the parameters of injecting and spraying, text editing, drawing summary and conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 16.03.2024; revised 17.05.2024; accepted 27.05.2024



Структура течения и периодические процессы в дискообразной вихревой камере гидродинамического кавитатора

Е. Г. Иванов[✉], И. Л. Воротников, А. В. Пасин,
А. В. Седов, М. В. Ошурков

Нижегородский государственный
агротехнологический университет
(г. Нижний Новгород, Российская Федерация)

✉ ivanov.e.g@mail.ru

Аннотация

Введение. Суть акустико-кавитационных процессов состоит в том, что через жидкость пропускают звук с давлением во фронте волны более 3 бар, что вызывает местные разрывы жидкости в вакуумметрическую фазу волны и их коллапс – в манометрическую. Противоположные стенки каждой каверны при их коллапсе сближаются со скоростью, превышающей две скорости звука, за счет чего достигается высокая плотность энергии в точке встречи. Новизна настоящей работы подтверждается результатами периодически воспроизводимого информационно-патентного анализа, а также полученными четырьмя патентами на изобретения по рассматриваемой теме. **Цель исследования.** Повышение акустико-кавитационных качеств дискообразной вихревой камеры, используемой в качестве жидкостного свистка.

Материалы и методы. В работе использованы числовое моделирование течений в среде FlowVision, экспериментальное определение скоростей потоков трубкой Пито, метод пленок, снятие амплитудно-частотной характеристики программой SpectraPLUS 5.0, визуализация потоков и процессов на оптически прозрачных устройствах методом красящих индикаторов в стробоскопическом освещении скоростной видеосъемкой.

Результаты исследования. Выявлено корректирующее действие пульсаций насоса $f = 300$ Hz на механизм звукообразования. Дискообразность устройства, обуславливающая ограждение входного потока в поперечном сечении с трех направлений, способствует созданию более выразительного акустического сигнала, образованию двух сопряженных торовых вихрей вдоль обечайки, что обеспечивает однородность окружного течения, затухание продольных высокочастотных колебаний $f = 200$ kHz, создание периодических зон повышенного давления вдоль обечайки. Сосредоточенный тангенциальный вход в устройство обуславливает центральную асимметрию течений в нем и ряд процессов, создающих акустический шум.

Обсуждение и заключение. Частота полезного акустического сигнала в вихревой камере пропорциональна скорости транзитного потока, а амплитуда – размерам устройства. Вместе с полезным сигналом, созданным взаимодействием окружной и входной частей транзитного потока, в устройстве создаются шумы близких частот. Другие источники шумообразования обусловлены наличием сосредоточенного тангенциального входа. Образование двух торовых сопряженных вихрей вдоль обечайки может быть использовано как средство управления процессом взаимодействия частей транзитного потока. Дискообразная вихревая камера сочетает в себе функции звукообразования и возможности создания центробежного поля, что расширяет ее технологические возможности.

© Иванов Е. Г., Воротников И. Л., Пасин А. В., Седов А. В., Ошурков М. В., 2024



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

Ключевые слова: дискообразная вихревая камера, вода, кавитация, потоки жидкостности, звук, частота звука, акустический сигнал

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Структура течений и периодические процессы в дискообразной вихревой камере гидродинамического кавитатора / Е. Г. Иванов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 444–460. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.444-460>

Flow Structure and Periodic Processes in a Disc-Shaped Vortex Chamber of a Hydrodynamic Cavitor

E. G. Ivanov[✉], I. L. Vorotnikov, A. V. Pasin,
A. V. Sedov, M. V. Oshurkov

*Nizhny Novgorod State Agrotechnological University
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)*

[✉] ivanov.e.g@mail.ru

Abstract

Introduction. The essence of the acoustic – cavitation processes is that the liquid is passed through sound with a pressure at the wave surface of more than 3 bar that causes local breaks of the liquid in the vacuum phase of the wave and the collapse in the manometric phase. The opposite walls of each cavern in the collapse approach at a speed exceeding two speed of sound, due to which a high energy density is achieved at the meeting point, and what is especially valuable is the mutual transitions of energies from one form to another, unattainable under normal conditions, and, moreover, as inside cavitation area and near it. The novelty of the work is confirmed by the results of a periodic information and patent analysis, and by four patents received for inventions on the topic under consideration. **Aim of the Study.** The study is aimed at improving the acoustic-cavitation qualities of a disk-shaped vortex chamber used as a liquid whistle.

Materials and Methods. In the study, there were used numerical modeling of flows in the FlowVision program, experimental determination of flow rates using a pitot tube, film method, removal of frequency response using SpectraPLUS 5.0, and visualization of flows and processes on optically transparent devices by the method of color indicators in stroboscopic lighting high-speed video shooting.

Results. The mechanism of sound generation and noise in the flow transiting through the device has been found. The corrective effect of pump pulsations $f = 300$ Hz on the sound generation mechanism was revealed. The disc-shaped character of the device, which encloses the input flow in cross section from three directions, contributes to creating a more expressive acoustic signal, forming two conjugate torus vortices along the shell that ensures uniformity of the circumferential flow, attenuation of longitudinal high-frequency oscillations $f = 200$ kHz, and the creation of periodic zones of increased pressure along the shell. The concentrated tangential entrance to the device determines the central asymmetry of the flows in it and a number of processes that create acoustic noise.

Discussion and Conclusion. The frequency of the useful acoustic signal in the vortex chamber is proportional to the speed of the transit flow, and the amplitude is proportional to the dimensions of the device. Along with the useful signal created by the interaction of the peripheral and input parts of the transit flow, noise of similar frequencies is created in the device. Other sources of noise generation are due to the presence of a concentrated tangential input. The formation of two conjugate torus vortices along the shell can be used as a means of controlling the process of interaction between parts of the transit flow. The disc-shaped vortex chamber combines the functions of sound generation and the ability to create a centrifugal field, which expands its technological capabilities.

Keywords: disk-shaped vortex chamber, liquid, cavitation, flows, structure, sound, frequency

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

For citation: Ivanov E.G., Vorotnikov I.L., Pasin A.V., Sedov A.V., Oshurkov M.V. Flow Structure and Periodic Processes in a Disc-Shaped Vortex Chamber of a Hydrodynamic Cavitator. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):444–460. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.444-460>

Введение. Совершенствование существующих и создание новых технологических процессов целесообразно выполнять при использовании новых физических принципов действия, например, периодических акустико-кавитационных процессов. Суть этих процессов состоит в том, что при облучении воды звуковым полем в вакуумметрических фазах упругих волн образуются местные разрывы жидкости – каверны. В манометрические фазы противоположные стенки каждой каверны сближаются со скоростью, превышающей две скорости звука, за счет чего достигается чрезвычайно высокая плотность энергии в точке встречи. При этом особую ценность представляют взаимные переходы энергий из одних форм в другие, недостижимые в обычных условиях как внутри кавитационной области, так и рядом с ней.

Акустико-кавитационные технологии начали использоваться в 50-х гг. прошлого столетия. Сначала в металлургии, химической и горной промышленности, а затем еще более обширно в фармацевтической и сельскохозяйственной отраслях¹. При акустико-кавитационной обработке изменяются свойства воды. Например, при поливе водой, прошедшей обработку в кавитаторе, повышается всхожесть семян и интенсивность развития из них растений как за счет их непосредственной обработки в кавитаторе, так и за счет их последующего полива. Другим достоинством кавитационной обработки является возможность изменять концентрацию солей в растворах.

В предлагаемой работе рассматривается дискообразная вихревая камера, по которой отсутствует необходимая информация как по структуре потоков, так и по механизму звукообразования и источникам сопутствующих шумов.

Таким образом, целью работы является выявление и возможное усиление периодических процессов и течений, участвующих в создании необходимого акустического сигнала в дискообразной вихревой камере с тангенциальным входом и осевым выходом, а также вскрытие непроизводительных процессов и их ослабление.

Обзор литературы. Создание кавитационных областей можно обеспечить кавитатором гидродинамического типа, преимущества которого состоят в том, что при его использовании можно достичь значительной мощности и существенных размеров акустического поля, следовательно, и повышения производительности любых технологических процессов. Это обстоятельство позволяет их встраивать в производственные линии без риска разрушения конструкции, как это имеет место при использовании магнитострикционных и пьезоэлектрических излучателей упругих волн.

¹ Основы физики и техники ультразвука : учебное пособие для вузов / Б. А. Агранат [и др.]. М. : Высшая школа, 1987. 352 с.

Среди акустических излучателей гидродинамического типа можно выделить излучатели на основе пластин, обтекаемых потоком жидкости, излучатели на основе периодически воспроизводящихся и разрушающихся областей отрыва на уступах, поворотах, кольцевых струй и т. д., а также излучатели на основе взаимодействия сливающихся под углом потоков. Наименее изученным является акустический излучатель на основе взаимодействия потоков – он же составляет основу рабочего процесса дискообразной вихревой камеры с тангенциальным входом и центральным осевым выходом.

Особым достоинством такого излучателя является вихревой характер течения в нем, что важно, например, при необходимости одновременной сепарации компонентов рабочей среды наряду с ее кавитационной обработкой [1].

Вихревые камеры используются в промышленности с 30-х гг. прошлого столетия как самостоятельные устройства (вихревые камерные экстракторы осадка [2]; усилители сигналов в пневмонике; жидкостные свистки), а также как устройства, составляющие основу для других изделий (гидроциклоны [3; 4]; вихревая труба Ранка-Хилша при работе на газовых средах² [5; 6]; теплогенераторы Потапова для работы на жидкостях [7]).

В рассматриваемом качестве вихревая камера представляется как генератор акустических колебаний в жидкости. В промышленности имеются и другие устройства, создающие акустическое поле в жидкости, например, конические кавитационные устройства [8; 9], которые являются фрагментами трубы Вентури, а также размещенные на корпусе активные элементы [10], конструкции с использованием суперкавитирующих полостей [11], устройства, генерирующие кавитацию за счет потока, протекающего через перфорированные ограждения [12]. Конструкции рассмотренных устройств имеют протяженные размеры и требуют высоких скоростей жидкости, что обуславливает высокую металлоемкость и гидравлические потери.

В вихревой камере упругие колебания зарождаются от столкновения двух фрагментов одного потока – тангенциального входного и ранее вошедшего окружного – внутри камеры, что делает данное устройство компактным и малозатратным с точки зрения гидравлики.

Многие публикации по вихревым камерам касаются только вопросов сепарации многофазных жидкостей [3; 4]. В них рабочий процесс вихревой камеры обобщен с течением в продолжающемся объеме в виде конического пространства, что значительно видоизменяет структуру течений внутри вихревой камеры.

В работах [5; 13] представлена конструкция, в наибольшей степени соответствующая исследуемой вихревой камере, однако в них рассматривается камера в совокупности с цилиндрическим корпусом, а внимание акцентируется больше на течениях в самом корпусе. При этом рабочей средой является не вода, а газы, что исключает протекание кавитационных процессов.

Среди публикаций, посвященных вихревым камерам, работающим на воде, можно назвать достойные работы с точки зрения действующей совокупности

² Xue Y. The Working Principle of a Ranque-Hilsch Vortex Tube // School of Mechanical Engineering. The University of Adelaide South. Australia, 2012. 139 p. URL: <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/82139/8/02whole.pdf> (дата обращения: 11.04.2024).

физических процессов [14; 15] по установлению структуры потоков в вихревой камере, однако они посвящены устройству с протяженным в направлении оси вращения объемом, где также недостаточно акцентирована область взаимодействия конкурирующих потоков.

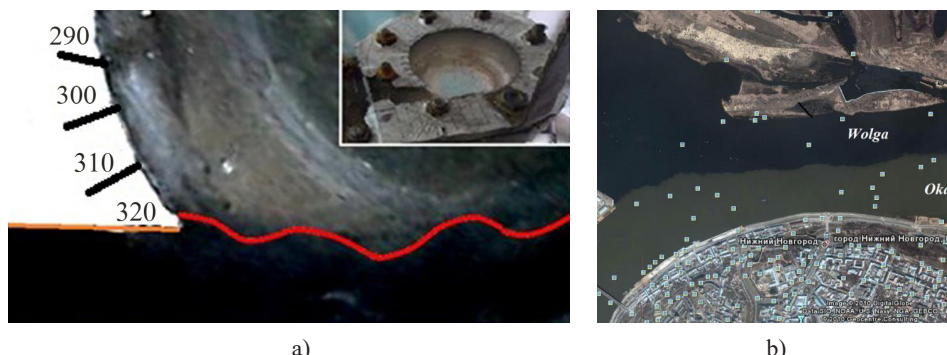
Механизм звукообразования в вихревых камерах не раскрыт в печати с позиций взаимодействия потоков. В литературе имеются отдельные публикации по гидродинамической акустической кавитации [16], но не в вихревой камере, а по динамике акустических волн [17] и механизму суперкавитации [11]. Вместе с тем, при использовании ранее аналогичных вихревых камер в пневмонике в качестве усилителей сигнала у них обнаружился серьезный недостаток – повышенный уровень акустических шумов, что с одной стороны, способствует созданию акустического поля высокой напряженности, а с другой – требует сепарации из всего воспроизводимого спектра только необходимых частот.

Материалы и методы. В соответствии с поставленной целью повышения эффективности рабочего процесса вихревой камеры путем усиления упругих колебаний требуемых частот и ослабления остальных следует выявить структуру течений в вихревой камере и обосновать роль каждого из них с оценкой диапазонов воспроизводимых ими частот.

Поскольку в рабочем процессе вихревой камеры присутствует совокупность различных физических явлений (течения, распространение акустических волн, механические вибрации, кавитация, физические поля и т. д.), появилась необходимость использования арсенала различных по содержанию методов исследования.

Для установления структуры течений и мест протекания кавитации авторами использовались различные теоретические (числовое моделирование в среде FlowVision; расчет скоростей течений на основе хрестоматийных положений гидромеханики) и экспериментальные подходы (метод пленок для установления зон проявления кавитации; визуализация потоков с помощью красящих растворов на низконапорном стенде вихревой камеры; метод скоростной видеосъемки на реальной конструкции вихревого кавитатора; определение скоростей отдельных элементов потоков с использованием трубки Пито и регистрирующих манометров класса точности 0,4; визуализация в стробоскопическом освещении на оптически прозрачных моделях; компьютерная программа Spectrum и студийный акустический микрофон для снятия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ); виброизмерительная аппаратура; аппаратура для измерения напряженности магнитного поля вокруг кавитационных областей).

Результаты исследования. Инициатором всех процессов, протекающих в дискообразной вихревой камере, является взаимодействие входного тангенциального потока с ранее вошедшей окружной его компонентой, совершившей почти полный оборот вдоль обечайки. В этом случае из-за периодического взаимного обжатия конкурирующих потоков создаются фронты давлений (рис. 1), при прохождении которых через внутренний объем вихревой камеры создается кавитация (рис. 2).



Р и с. 1. Образование упругих волн от слияния под углом двух потоков:
 а) в вихревой камере (на специальном стенде с введением красящего раствора-визуализатора);
 б) при слиянии гигантских потоков рек Оки и Волги

F i g. 1. Formation of elastic waves from the merger at an angle of two flows:
 а) in a vortex chamber (on a special stand with the introduction of a coloring solution-visualizer);
 б) at the confluence of the giant streams of the Oka and Volga rivers

Источник: а) снимок сделан при исследовании взаимодействия входного и окружного потоков (автор Е. Г. Иванов, 22.09.2023); б) снимок сделан в приложении Google Карты.

Source: а) the snapshot is made in studying the interaction of input and circumferential flow (author E.G. Ivanov, 22.09.2023); б) the snapshot is made in the Google Maps app.



Р и с. 2. Визуализация проявления акустико-кавитационных процессов от конкурентных сливающихся потоков методом пленок

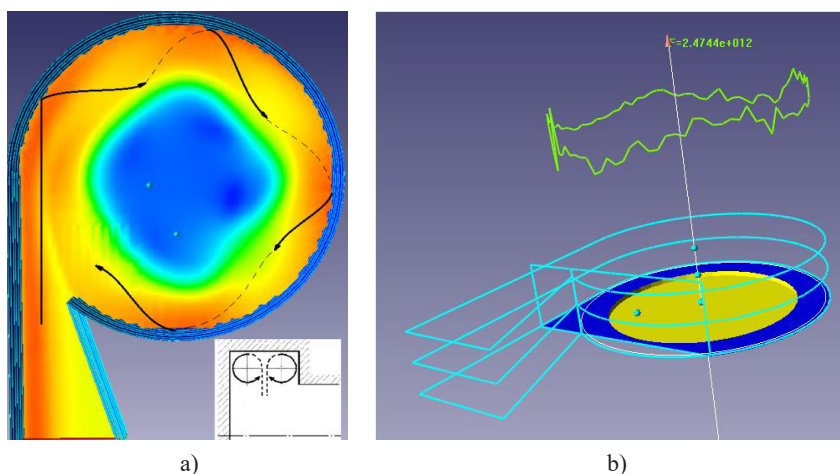
F i g. 2. Visualization of the manifestation of acoustic-cavitation processes from competitive merging flows using the film method

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

Source: hereinafter in this article all figures are drawn up by the authors.

При этом стоит отметить, что энергия упругого сигнала очень мала по сравнению с энергией потоков, образующих сигнал. В акустических излучателях гидродинамического типа она не превышает 6 %³.

³ Основы физики и техники ультразвука.



Р и с. 3. Распределение давления по объему вихревой камеры и наглядная интерпретация двух сопряженных торовых вихрей вдоль обечайки корпуса, полученных с помощью программного комплекса FlowVision:
а) линии тока окружного вихревого потока; б) распределение давлений вдоль обечайки корпуса от воздействия на него торовых вихрей

F i g. 3. Pressure distribution throughout the volume of the vortex chamber and a visual interpretation of two conjugate torus vortices along the body shell, obtained using the FlowVision software package:
a) streamlines of the circumferential vortex flow; b) distribution of pressure along the shell of the housing due to the influence of torus vortices on it

По мере дальнейшего прохождения вошедшего потока его структура на окружном участке подвергается «эффекту поворота» с образованием двух сопряженных торовых вихрей (рис. 3), которые взаимодействуют с обечайкой путем рикошета в четырех точках, обуславливая местное повышение давления. Частота вращения жидкости в торовом вихре $n_{\text{тор}}$ может быть определена из выражения:

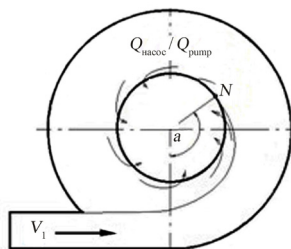
$$n_{\text{тор}} \cong \frac{2V_1}{\pi R},$$

где V_1 – входная скорость потока в вихревую камеру, м/с; R – радиус обечайки вихревой камеры, м.

Таким образом, каждая неоднородность параметров потока будет создавать шум с частотой пропорциональной числу соударений об обечайку в течение времени нахождения в рабочем объеме, то есть $f \cong 420 \text{ Hz}$.

Рассматриваемые сопряженные торовые вихри способствуют перемешиванию и однородности параметров потока в радиальном направлении, а также обуславливают дополнительные затраты энергии на их поддержание.

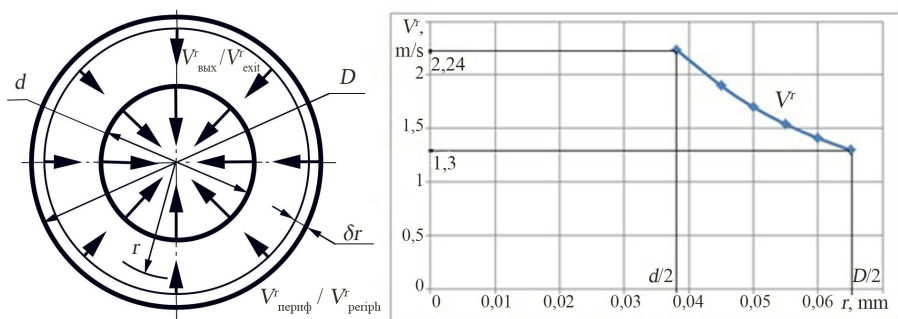
По мере дальнейшего движения в потоке за счет гидравлических сопротивлений от деформации при повороте, его скорость падает, что приводит к увеличению поперечного сечения, и на угловой величине α (рис. 2, 4) его внутренняя граница достигает точки входа в центральное осевое отверстие, после которой он стекает в центральное осевое отверстие по всей длине окружности.



Р и с. 4. Конфигурация транзитного течения в вихревой камере

F i g. 4. Configuration of transit flow in the vortex chamber

Следует отметить, что у этого потока должна возрастать радиальная составляющая скорости по условию постоянства расходов в районе обечайки $V_{\text{периф}}^r = \frac{Q}{\pi D b}$ и у горловины центрального осевого отверстия $V_{\text{вых}}^r = \frac{Q}{\pi d b}$ по закономерности, изображенной на рисунке 5.



a)

b)

Р и с. 5. Закономерность изменения осредненной радиальной составляющей скорости рабочей среды вдоль радиуса вихревой камеры:

a) схема осредненного радиального течения от $V_{\text{периф}}^r$ до $V_{\text{вых}}^r$;

b) закономерность изменения радиальной скорости осредненного радиального течения

F i g. 5. The pattern of changes in the averaged radial component of the velocity of the working medium along the radius of the vortex chamber:

a) diagram of the averaged radial flow from V_{periph}^r to V_{exit}^r ;

b) the pattern of changes in the radial velocity of the averaged radial flow

Радиальная составляющая скорости (рис. 5) определяется выражением:

$$V^r = \frac{Q}{2\pi b r},$$

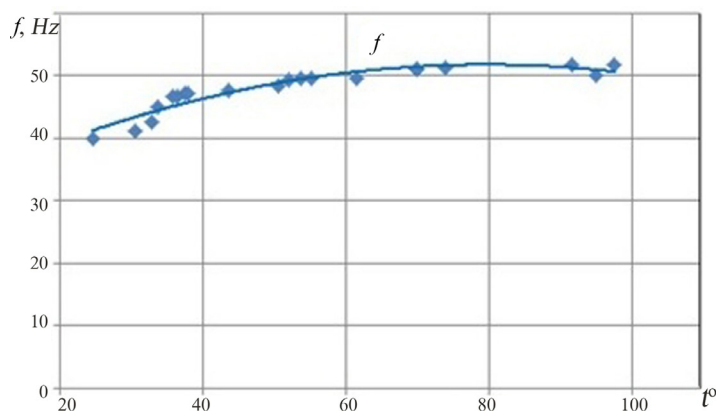
где Q – подача насоса кавитатора, $\text{м}^3/\text{с}$; b – толщина вихревой камеры, м; D – диаметр вихревой камеры, м; d – диаметр выходного осевого отверстия вихревой камеры, м; r – текущий радиус вихревой камеры, м.

Однако по причине того, что в реальной конструкции вихревой камеры отсутствует симметрия потоков (рис. 4) вследствие наличия тангенциального входа, радиальная составляющая неравномерна по окружности, что объясняет создание акустического шума с частотой, определяемой частотой вращения рабочей среды на радиусе кромки центрального выходного отверстия. Представим это в виде формулы:

$$f = \frac{V_{\text{окр}}}{\pi d} = 40 \div 55 \text{ Hz},$$

где f – частота вращения рабочей среды на радиусе кромки центрального выходного отверстия, Hz; $V_{\text{окр}}$ – окружная скорость вблизи кромки центрального выходного отверстия, м/с.

Окружная скорость $V_{\text{окр}}$ рассчитывается по скоростному напору, определенному экспериментально, что дало основание для расчета частоты создаваемых упругих волн (рис. 6).

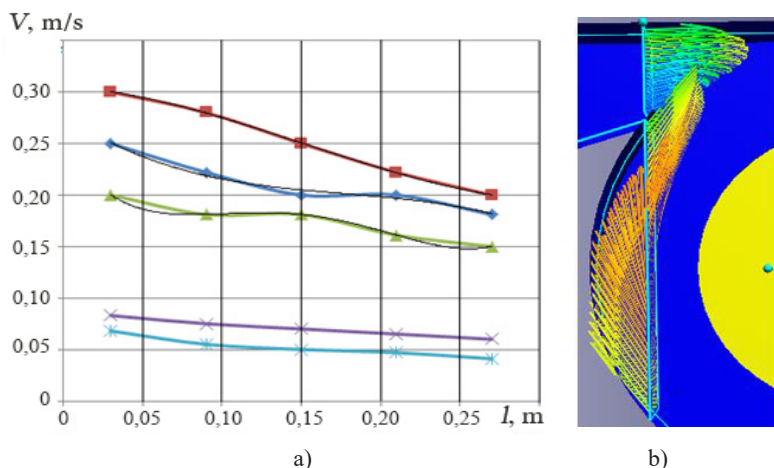


Р и с. 6. Частота упругих колебаний в жидкости, вызванных неравномерностью в окружном направлении радиальной составляющей скорости транзитного потока при различных температурных режимах

F i g. 6. Frequency of elastic vibrations in a liquid caused by unevenness in the circumferential direction of the radial component of the transit flow velocity at different temperature conditions

Зависимость $f(t^{\circ})$ на режимах невысоких температур (23–78 °С) имеет восходящий характер вследствие повышения скорости течений в вихревой камере из-за снижения плотности рабочей жидкости. В этом случае плотность жидкости объясняет снижение момента на валу питающего насоса. Далее повышается частота вращения рабочего колеса в пределах диапазона скольжения приводного асинхронного двигателя, что и вызывает рост сначала подачи насоса, а затем и скоростей в структуре потоков. Однако при достижении температур $t = 70 - 80$ °С рабочая жидкость (вода) становится более склонной к разрыву сплошности, наступают кавитационные процессы в питающем насосе, что снижает его подачу, скорость потоков, частоту упругих возмущений в выходном расходном потоке.

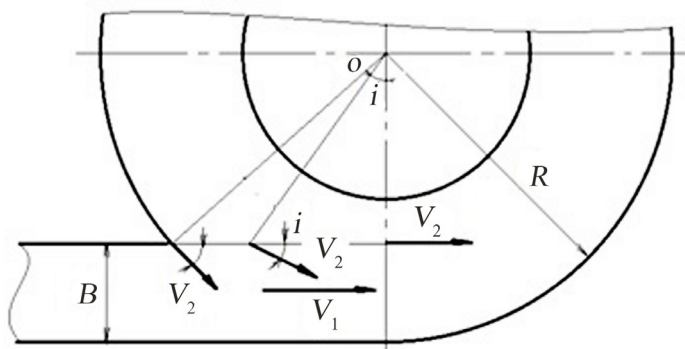
Так, снижение интенсивности окружной части потока происходит из-за двух вышеперечисленных обстоятельств – сопряженных торовых вихрей и распределенных по длине окружности выходного отверстия стоков (рис. 7).



Р и с. 7. Интерпретация снижения интенсивности окружной части потока, полученная:
а) на стенде с красящим раствором-визуализатором (рис. 1);
б) числовым моделированием в среде FlowVision

Fig. 7. Interpretation of the decrease in the intensity of the flow circumferential part, obtained:
a) on a stand with a coloring solution-visualizer (Fig. 1);
b) by numerical modeling in the FlowVision program

Входящий в вихревую камеру поток вначале отжимается окружным течением к периферии (рис. 4) и не участвует в создании транзитного расхода. На этом секторе потоки взаимодействуют, создавая как полезный акустический сигнал (рис. 1), так и шумы всех мод.



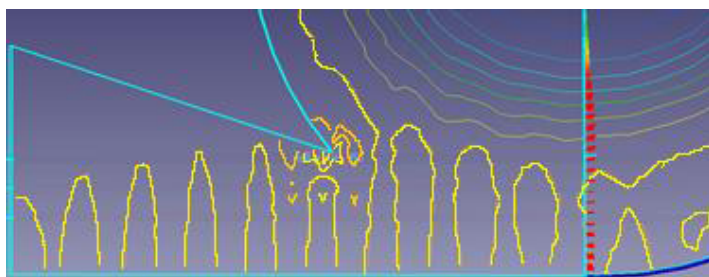
Р и с. 8. Схема взаимодействия входного V_1 и окружного V_2 фрагментов на входе в вихревую камеру

Fig. 8. Scheme of interaction of the input V_1 and circumferential V_2 fragments at the entrance to the vortex chamber

Появление шумов при взаимодействии потоков вызвано тем, что отдельные элементы потоков имеют разные углы взаимодействия ($\arccos \frac{R-B}{R} \geq i \geq 0$) при их слиянии, а также разные энергии линий тока окружного потока, что обуславливает дисгармоничность получаемого акустического сигнала и генерирование шумов близких частот (рис. 8, 1а).

С целью получения близких значений параметров сливающихся потоков авторами настоящего исследования предложены техническое решение, предполагающее предварительное разделение потока после насоса на два равнозначных с последующим их симметричным слиянием [18], и вихревая камера с другим видом взаимодействия потоков. Для исключения неравномерности энергии отдельных линий тока авторы предлагают установить между потоками в районе их взаимодействия различные виды прокладок [19].

Периодическое обжатие входного потока окружным, создающее периодическую структуру последующего течения, обуславливает чередующиеся области повышенного и пониженного давлений с последующим взаимодействием фронтов повышенных давлений и периодической сменой знака давлений в этих областях (рис. 9).



Р и с. 9. Интерпретация периодичности давлений во входящем потоке от его взаимодействия с окружным (получена числовым моделированием в среде FlowVision)

F i g. 9. Interpretation of the periodicity of pressure in the incoming flow from its interaction with the surrounding one (obtained by numerical modeling in the FlowVision program)

Этот процесс также создает акустический шум в диапазоне частот:

$$f_4 = \frac{4c f_c}{V_1} \cong 200 \text{ kHz},$$

где f_c – расчетная частота вихревой камеры, Hz; V_1 – скорость входного потока, m/s; c – скорость звука в воде, m/s.

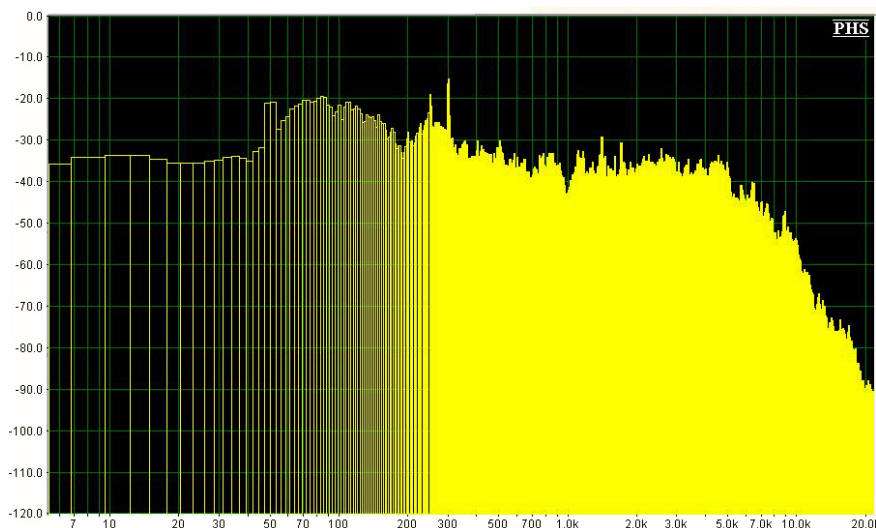
Следующим источником звукообразования является область отрыва потока от глухой торцевой стенки вихревой камеры, которая состоит из двух частей – центральной постоянной, заполненной продуктами дегазации и паром, и кольцевой мерцающей с частотой $f_3 \cong 10 \text{ Hz}$ (рис. 10).



Р и с. 10. Визуализация области отрыва потока через оптически прозрачную глухую торцевую стенку вихревой камеры

F i g. 10. Visualization of the flow separation region through the optically transparent solid end wall of the vortex chamber

В итоге выявленные источники создают акустические сигналы, АЧХ которых представлена на рисунке 11.



Р и с. 11. АЧХ вихревого кавитатора с насосным агрегатом

F i g. 11. AFC of a vortex cavitator with a pumping unit

Согласно АЧХ исследуемой вихревой камеры можно констатировать, что амплитуда упругих колебаний в диапазоне $f = 1\text{--}3\text{ kHz}$ (требуемые частоты) не превышает амплитуды колебаний насосного агрегата $f_p = 50\text{ Hz}$ и пульсаций в насосе от взаимодействия каждой его лопасти с языком корпуса $f = z \cdot n = 300\text{ Hz}$, что говорит о необходимости совершенствования устройства по отмеченным направлениям.

Обсуждение и заключение. Специфика конструкции дискообразной вихревой камеры с тангенциальным входом и осевым центральным выходом отражается на особенностях ее рабочего процесса.

Ограждение входного потока с трех направлений – обечайкой по периферии, торцовыми крышками корпуса по бокам – создает более выразительный и полезный акустический сигнал при взаимодействии окружной и входящей компонент потока, способствует образованию двух сопряженных торковых вихрей в продольном направлении. Они обеспечивают большую однородность течения на криволинейной траектории за счет перемешивания в радиальном направлении, затухание продольных колебаний во входном потоке при достижении им криволинейного участка.

Сосредоточенный тангенциальный вход обозначает центральную асимметрию течений в вихревой камере и значит ряд процессов, обуславливающих акустический шум: от неравномерности радиальной составляющей выходного течения по окружному направлению; от образования двух сопряженных торковых вихрей в продольном направлении, обеспечивающих последовательные биения по обечайке корпуса; от периодического отрыва, образованного в центральной части глухой торцовой крышки.

Взаимодействие входной и окружной компонент расходного потока, кроме полезного акустического сигнала, создает акустический шум вследствие разных условий взаимосвязи линий тока.

Наиболее выразительным звуковым источником в рабочем процессе вихревой камеры при ее работе с центробежным насосом являются пульсации от взаимодействия лопастей рабочего колеса с языком корпуса насоса с частотой $f = 300 \text{ Hz}$.

Установлен механизм образования упругой волны в дискообразной вихревой камере – взаимодействие двух частей одного потока: входного тангенциального и предыдущей его части, уже совершившей почти полный оборот вдоль обечайки. Выявлена дисгармоничность получаемого акустического сигнала вследствие разных условий взаимодействия входной и окружной частей потоков как на разных радиусах вихревой камеры, так и за счет разных скоростей элементов окружного потока. Также установлено корректирующее влияние пульсаций силового насоса с частотой 300 Hz на образование полезных упругих волн. В пределах каждого периода пульсаций укладывается несколько циклов (пропорционально скорости) взаимодействия входного и окружного потоков.

Выявлена структура потоков в вихревой камере, состоящая из торковых сопряженных вихрей в окружном потоке,двигающемся вдоль обечайки вихревой камеры; переменной радиальной составляющей скорости расходного потока в направлении центрального выходного отверстия; асимметрии структуры вышеназванных потоков, обусловленных наличием входного тангенциального патрубка.

Обнаружены источники акустических шумов: при генерации полезного акустического сигнала за счет разных условий взаимодействия входной и окружной частей потоков как из-за разных углов слияния их частей, так и за счет разных энергий отдельных линий тока окружного потока; шумов в выходящем из вихревой камеры вихревом потоке с $f = 40\text{--}55 \text{ Hz}$, образованных вследствие неравномерности по окружности радиальной составляющей скорости расходного потока; в окружном потоке с $f = 200 \text{ kHz}$, возникающем за счет периодического сжатия и растяжения последовательно расположенных чередующихся разреженных и сжатых участков, порожденных от взаимодействия входного и окружного потоков; от пульсаций



параметров потока из силового насоса с частотой $f = z \cdot n = 300$ Hz; от вибраций двигателя и элементов системы привода с частотой $f = 50$ Hz.

Предложены конструктивные мероприятия по усилению полезных акустических сигналов за счет установки подвижной прокладки в плоскости взаимодействия окружного и входного потоков и за счет замены вихревой камеры камерой с организацией взаимодействия двух пересекающихся идентичных потоков с возможностью изменения угла их взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sivakumar M., Tang S. Y., Tan Kh. W. Cavitation Technology – A Greener Processing Technique for the Generation of Pharmaceutical Nanoemulsions // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21, Issue 6. P. 2069–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.025>
2. Athar M., Srotiya S. Velocity Distribution in Vortex Chamber at High Water Abstraction Ratio // *Hydrologic Modeling*. 2018. Vol. 81. P. 459–473. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_32
3. Desander Mini-Hydrocyclones Applied to the Separation of Microspheres and Sand in Non-Newtonian Fluid: Efficiencies and Drag Analysis / D. G. Alves [et al.] // *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 234. Article no. 116131. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116131>
4. Study on Multi-Component Particle Behavior in a Hydrocyclone Classifier Using Experimental and Computational Fluid Dynamics Techniques / M. Padhi [et al.] // *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 229. Article no. 115698. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115698>
5. Investigation on Temperature Separation and Flow Behaviour in Vortex Chamber / Y. Matsuno [et al.] // *Journal of Thermal Science*. 2015. Vol. 24. P. 149–154. <https://doi.org/10.1007/s11630-015-0767-1>
6. Experimental Study on Temperature Separation in Vortex Chamber / Sh. Matsuo [et al.] // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 105. P. 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.073>
7. Теплогенератор и устройство для нагрева жидкостей : патент 2045715 Российская Федерация / Потапов Ю. С. ; заявл. 26.04.1993 ; опубл. 10.10.1995. URL: <https://allpatents.ru/patent/2045715.html> (дата обращения: 11.04.2024).
8. Способ работы эжекторной тепловыделяющей установки : патент 2127832 Российская Федерация / Фисенко В. В. № 97103798/06 ; заявл. 12.03.1997 ; опубл. 20.03.1999.
9. Способ преобразования электрической энергии в тепловую в эжекторно-вихревой установке : патент 2253047 Российская Федерация / Мамаев А. Н. № 2002132569/06 ; заявл. 04.12.2002 ; опубл. 20.08.2004.
10. Min J. C., Ki K. C., Gyu P. W. Cavitation Device of Underwater Moving Body and Underwater Moving Body Having the Same : patent 2013298819 USA. № US 8,881,667 B2 ; application 13.08.2012 ; publication 11.11.2014. URL: <https://patents.google.com/patent/US8881667B2/en> (дата обращения: 11.04.2024).
11. Karn A., Arndt R. E. A., Hong J. An Experimental Investigation into Supercavity Closure Mechanisms // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 789. P. 259–284. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.680>
12. Rade V. Cavitation Generation : patent 2015001315 Great Britain. № WO2015001315A2 ; application 02.07.2013 ; publication 01.08.2015. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2015001315A2/en> (дата обращения: 11.04.2024).
13. Rafiee S. E., Sadeghiazad M. M. Three-Dimensional CFD Simulation of Fluid Flow inside a Vortex Tube on Basis of an Experimental Model – the Optimization of Vortex Chamber Radius // *International Journal of Heat and Technology*. 2016. Vol 34, No. 2. P. 236–244. <https://doi.org/10.18280/ijht.340212>
14. Akhmetov D. G., Akhmetov T. D. Flow Structure in a Vortex Chamber // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57, Issue 5. P. 879–887. <https://doi.org/10.1134/s0021894416050151>

15. Akhmetov D. G., Akhmetov T. D., Pavlov V. A. Flow Structure in a Ranque-Hilsch Vortex Tube // *Doklady Physics*. 2018. Vol. 63. P. 235–238. <https://doi.org/10.1134/s1028335818060010>
16. Mechanism and Dynamics of Hydrodynamic-Acoustic Cavitation (HAC) / P. Wu [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 49. P. 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.021>
17. Numerical Simulation of Single Bubble Dynamics under Acoustic Standing Waves / S. Qiu [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 49. P. 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.006>
18. Гидродинамический кавитатор : патент 2588298 Российская Федерация / Иванов Е. Г. № 2015104721 ; заявл.12.02.2015 ; опубл. 27.04.2016.
19. Теплогенератор : патент 2594394 Российская Федерация / Иванов Е. Г., Самodelкин А. Г. № 2014134116 ; заявл.19.08.2014 ; опубл. 10.03.2016.

REFERENCES

1. Sivakumar M., Tang S.Y., Tan Kh.W. Cavitation Technology – A Greener Processing Technique for the Generation of Pharmaceutical Nanoemulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014;21(6):2069–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.025>
2. Athar M., Srotiya S. Velocity Distribution in Vortex Chamber at High Water Abstraction Ratio. *Hydrologic Modeling*. 2018;81:459–473. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_32
3. Alves D.G., Teodoro da Silva J.T., Quintino D.B. Ataide C.H. Desander Mini-Hydrocyclones Applied to the Separation of Microspheres and Sand in Non-Newtonian Fluid: Efficiencies and Drag Analysis. *Separation and Purification Technology*. 2020;234:116131. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116131>
4. Padhi M., Mangadoddy N., Sreenivas T., Vakamalla T.R., Mainza A.N. Study on Multi-Component Particle Behavior in a Hydrocyclone Classifier Using Experimental and Computational Fluid Dynamics Techniques. *Separation and Purification Technology*. 2019;229:115698. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115698>
5. Matsuno Y., Fukushima Y., Matsuo Sh., Hashimoto T., Setoguchi T., Kim H.D. Investigation on Temperature Separation and Flow Behaviour in Vortex Chamber. *Journal of Thermal Science*. 2015;24:149–154. <https://doi.org/10.1007/s11630-015-0767-1>
6. Matsuo Sh., Matsuno Y., Fukushima Y., Mamun M., Hashimoto T., Setoguchi T., et al. Experimental Study on Temperature Separation in Vortex Chamber. *Procedia Engineering*. 2015;105:464–471. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.073>
7. Potapov Yu.S. [Heat Generator and Device for Heating Liquids]. Patent 2045715 Russian Federation. 1995 October 10. (In Russ.) Available at: <https://allpatents.ru/patent/2045715.html> (accessed 11.04.2024).
8. Fisenko V.V. [The Method of Operation of the Ejector Heat Generating Unit]. Patent 2127832 Russian Federation. 1999 March 20. (In Russ.)
9. Mamaev A.N. [A Method for Converting Electrical Energy into Thermal Energy in an Ejector-Vortex Installation]. Patent 2253047 Russian Federation. 2004 August 20. (In Russ.)
10. Min J.C., Ki K.C., Gyu P.W. Cavitation Device of Underwater Moving Body and Underwater Moving Body Having the Same. Patent 2013298819 USA. 2014 November 11. Available at: <https://patents.google.com/patent/US8881667B2/en> (accessed 11.04.2024).
11. Karn A., Arndt R.E.A., Hong J. An Experimental Investigation into Supercavity Closure Mechanisms. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016;789:259–284. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.680>
12. Rade V. Cavitation Generation. Patent 2015001315 Great Britain. 2015 August 1. Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2015001315A2/en> (accessed 11.04.2024).
13. Rafiee S.E., Sadeghiazad M.M. Three-Dimensional CFD Simulation of Fluid Flow Inside a Vortex Tube on Basis of an Experimental Model – the Optimization of Vortex Chamber Radius. *International Journal of Heat and Technology*. 2016;34(2):236–244. <https://doi.org/10.18280/ijht.340212>



14. Akhmetov D.G., Akhmetov T.D. Flow Structure in a Vortex Chamber. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016;57(5):879–887. <https://doi.org/10.1134/s0021894416050151>
15. Akhmetov D.G., Akhmetov T.D., Pavlov V.A. Flow Structure in a Ranque-Hilsch Vortex Tube. *Doklady Physics*. 2018;63:235–238. <https://doi.org/10.1134/s1028335818060010>
16. Wu P., Bai L., Lin W., Wang X. Mechanism and Dynamics of Hydrodynamic-Acoustic Cavitation (HAC). *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.021>
17. Qiu S., Ma X., Huang B., Li D., Wang G., Zhang M. Numerical Simulation of Single Bubble Dynamics under Acoustic Standing Waves. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:196–205. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.006>
18. Ivanov E.G. [Hydrodynamic Cavitator]. Patent 2588298 Russian Federation. 2016 April 27. (In Russ.)
19. Ivanov E.G., Samodelkin A.G. [Heat Generator]. Patent 2594394 Russian Federation. 2016 August 20. (In Russ.)

Об авторах:

Иванов Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3909>, ivanov.e.g@mail.ru

Воротников Игорь Леонидович, доктор экономических наук, профессор, ректор Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3631-8275>, vorotnikov.i@nnsaa.ru

Пасин Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0797-4743>, pasin_av@mail.ru

Седов Александр Валерьевич, магистрант Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3460-7420>, s.c.s.p.sedov@yandex.ru

Ошурков Максим Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5132-6440>, m.oshurkov@nnsaa.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. Г. Иванов – научное руководство, подготовка текста.

И. Л. Воротников – общее руководство проектом, анализ и дополнение текста статьи.

А. В. Пасин – поиск аналитических материалов в отечественных и зарубежных источниках.

А. В. Седов – верстка и форматирование работы.

М. В. Ошурков – сбор данных и доказательств, проведение экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 26.02.2024; поступила после рецензирования 25.04.2024;
принята к публикации 06.05.2024*

Authors the contribution:

Evgeni G. Ivanov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3909>, ivanov.e.g@mail.ru

Igor L. Vorotnikov, Dr.Sci. (Econ.), Professor, Rector of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3631-8275>, vorotnikov.i@nnsaa.ru

Aleksander V. Pasin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0797-4743>, pasin_av@mail.ru

Alexander V. Sedov, Master's Student of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3460-7420>, c.c.c.p.sedov@yandex.ru

Maksim V. Oshurkov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5132-6440>, m.oshurkov@nnsaa.ru

Authors contribution:

E. G. Ivanov – research supervision, writing of the draft.

I. L. Vorotnikov – managing the research project, analyzing and supplementing the text.

A. V. Pasin – searching for analytical materials in Russian and international sources.

A. V. Sedov – making the layout and the formatting of the article.

M. V. Oshurkov – collecting data and evidence, implementation of experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 26.02.2024; revised 25.04.2024; accepted 06.05.2024



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

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.7:621.3.089

doi: 10.15507/2658-4123.034.202403.461-473



Критические параметры атермического электропластического эффекта в металлических материалах

В. В. Столяров

Институт машиноведения РАН

(г. Москва, Российская Федерация)

vlstol@mail.ru

Аннотация

Введение. Пластическая деформация и электрический ток, действующие раздельно, обычно оказывают противоположное влияние на деформационное поведение и напряжения течения в электропроводящих материалах. В случае совместного действия пластической деформации и приложенного электрического тока результат не является заранее предсказуемым. Исследование синергетического эффекта деформации и электрического тока может быть использовано для обработки металлов давлением.

Цель исследования. Демонстрация наличия пороговых параметров импульсного тока, при которых проявляется атермический электропластический эффект в различных материалах.

Материалы и методы. Выполнены испытания на растяжение при различных режимах тока, которые исключают повышенный вклад теплового эффекта в снижение напряжений течения – плотности и скважности. Изучены фратографические особенности поверхности разрушения методом растровой сканирующей микроскопии. Определены пороговые значения параметров тока, при которых возникают скачки напряжения, связанные с электропластическим эффектом.

Результаты исследования. Показано влияние плотности и скважности импульсного тока на проявление электропластического эффекта. Оба параметра имеют пороговые значения, выше которых электропластический эффект становится наблюдаемым (при плотности $j > j_{кр}$) или атермическим (при скважности $Q > Q_{кр}$). Все виды растяжения сопровождаются вязким характером разрушения и появлением пор, наиболее интенсивно образующихся при введении тока.

Обсуждение и заключение. В сплавах с низким электросопротивлением пороговая плотность импульсного тока, соответствующая возникновению электропластического эффекта, выше, чем в сплавах с высоким электросопротивлением. Повышение скважности импульсного тока снижает температуру деформируемого образца, что позволяет рассматривать электропластический эффект как атермический.

© Столяров В. В., 2024



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

Ключевые слова: растяжение, импульсный ток, плотность тока, скажность, поверхность разрушения

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Столяров В. В. Критические параметры атермического электропластического эффекта в металлических материалах // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 461–473. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.461-473>

Critical Parameters of the Athermal Electroplastic Effect in Metallic Materials

V. V. Stolyarov 

*Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)*

 vlstol@mail.ru

Abstract

Introduction. Plastic deformation and electric current, acting separately, usually have opposite effects on the deformation behavior and flow stresses in electrically conductive materials. In the case of the combined action of plastic deformation and applied electric current, the result is not pre predictable. The study of the synergistic effect of deformation and electric current can be used for metal forming.

Aim of the Study. The study is aimed at demonstrating the existence of impulse current threshold parameters at which the athermal electroplastic effect manifests itself in various materials.

Materials and Methods. Tensile tests were performed at various current modes, which exclude the increased contribution of the thermal effect to the reduction of flow stresses – current density and duty cycle. The fractographic features of the fracture surface were studied using raster scanning microscopy. There were found the threshold values of current parameters at which stress jumps associated with the electroplastic effect occur.

Results. The influence of the density and duty cycle of the impulse current on the manifestation of the electroplastic effect is shown. Both parameters have threshold values, above which the electroplastic effect becomes observable (at density $j > j_{cp}$) or athermal (at duty cycle $Q > Q_{cp}$). All types of tension are accompanied by a viscous fracture and void formation, which is most intensively formed, when current is injected.

Discussion and Conclusion. In alloys with low electrical resistance, the threshold impulse current density corresponding to the occurrence of the electroplastic effect is higher than in alloys with high electrical resistance. Increasing the duty cycle of the impulse current reduces the temperature of the deformed sample that allows considering the electroplastic effect as athermal.

Keywords: tension, impulse current, current density, duty factor, fracture surface

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

For citation: Stolyarov V.V. Critical Parameters of the Athermal Electroplastic Effect in Metallic Materials. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):461–473. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.461-473>

Введение. Прохождение электрического тока по проводнику вызывает ряд хорошо известных эффектов, например, тепловой нагрев по закону Джоуля-Ленца [1], а также атермические скин- и пинч-эффекты [2] в случае импульсного тока. При совместном действии электрического тока и пластической деформации возникают дополнительные эффекты, обусловленные наличием в кристаллических телах структурных особенностей: границ зерен, тройных стыков, подвижных дефектов, например, дислокаций и вакансий. К таким эффектам относятся электропластический (ЭПЭ) [3–5] и магнитопластический [6] эффекты.

Проявление ЭПЭ хорошо изучено экспериментально и теоретически во многих металлических системах. При введении одиночных импульсов тока на кривой растяжения/сжатия появляются скачки напряжения вниз/вверх [5]. Мерой интенсивности эффекта в данном материале является амплитуда скачков, которая зависит от плотности тока, длительности импульса и частоты [7]. В меньшей степени используется такой важный параметр, как скважность, которая связывает между собой длительность и частоту импульсов [8]. Однако при введении многоимпульсного или постоянного тока скачки отсутствуют, а мерой эффекта становится общее снижение напряжений течения [9]. При этом повышается тепловой вклад тока, возникают связанные с ним изменения структуры и механических свойств проводников.

Целью статьи является определение критических параметров импульсного тока, обеспечивающих атермический электропластический эффект в металлических материалах.

Обзор литературы. Установлено, что структура, свойства материала, а также мода и параметры электрического тока являются определяющими при анализе особенностей деформационного поведения материалов в сопровождении электрического тока [10]. Предложено несколько физических механизмов, феноменологически объясняющих возникновение ЭПЭ, которые включают электронный ветер [11], локальный нагрев на границах зерен [12], разблокировку дислокаций на препятствиях [7], подавление двойникования и магнитные эффекты [13]. Поскольку ЭПЭ проявляется в заметном снижении сопротивления деформации и повышении технологической пластичности, то потенциально он может использоваться в обработке металлов давлением [14; 15]. Многие прикладные и теоретические аспекты электропластического эффекта представлены в недавнем обзоре [15]. Теоретической и практической проблемой является нагрев проводника при воздействии тока, который затрудняет экспериментальную оценку вклада каждого из сопутствующих эффектов, а также является препятствием при необходимости осуществления технологических процессов без нагрева. Для снижения теплового вклада от тока были выполнены растяжение в жидком азоте [1; 2], а также охлаждение воздухом [16]. Другим возможным подходом может быть выбор таких параметров электрического тока, при которых тепловой эффект минимален или отсутствует. В литературе их часто называют пороговыми или критическими. Проведенный анализ источников позволил выделить основные параметры импульсного тока, влияющие на деформационное поведение проводниковых материалов и тепловой эффект при прохождении импульсов тока, и установить их пороговые значения.

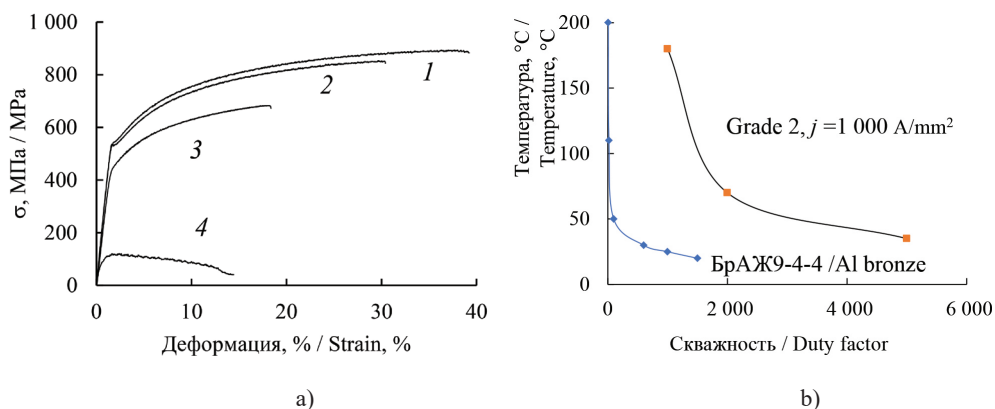
Материалы и методы. Объектами исследования были выбраны две группы материалов с отличающимся уровнем удельного электросопротивления. Среди хорошо проводящих материалов использовались: чистая медь М1 / Cu; медные сплавы – оловянная бронза (БрОЖ6.5-0.15 / Sn bronze), алюминиевая бронза (БрАЖ9-4-4 / Al bronze); алюминиевые сплавы – Al_2Cu_2Mn и АМг2. Среди слабо проводящих материалов применялись сплавы на основе титана (ВТ1-00, Grade 4, ВТ6). Материалы были исследованы в отожженном крупнозернистом (КЗ) состоянии. Для сравнения сплав Grade 4 применялся также и в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии, полученном при помощи интенсивной пластической деформации методом РКУП Конформ [17; 18].

Механические испытания с током и без тока выполняли на горизонтальной машине ИМ-5081 при скорости растяжения 0,8 мм/мин ($1.3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) на плоских образцах с размерами $1 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$. Варьируемыми параметрами импульсного тока были плотность тока $j = 100 - 4\,000 \text{ А/мм}^2$ и скважность импульсов $Q = T/\tau = 10 - 20\,000$, где T и τ – период и длительность импульса.

Длительность импульса во всех опытах была постоянной и соответствовала $\tau = 1\,000 \text{ мкс}$. Выбранные параметры позволяли уверенно наблюдать проявление ЭПЭ в виде скачков напряжения $\Delta\sigma$ вниз или снижения напряжений течения величиной не менее 5 МПа.

Фрактографические изображения поверхностей разрушения после испытаний на растяжение были получены с помощью сканирующей электронной микроскопии на приборе Tescan Mira 3 LMU.

Результаты исследования. *Влияние скважности.* Рассмотрим влияние скважности на деформационное поведение при относительно малых значениях $10 \leq Q \leq 100$ в сравнении с растяжением без тока на примере бронзы БрАЖ9-4-4 (рис. 1а).



Р и с. 1. Влияние скважности тока на деформационное поведение (а) и температуру образца (б): 1 – без тока; 2 – $Q = 100, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 3 – $Q = 20, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 4 – $Q = 10, j = 200 \text{ А/мм}^2$

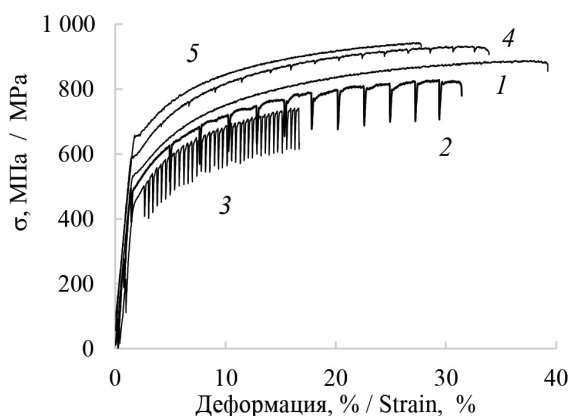
F i g. 1. Influence of duty cycle on deformation behavior (a) and sample temperature (b): 1 – no current; 2 – $Q = 100, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 3 – $Q = 20, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 4 – $Q = 10, j = 200 \text{ А/мм}^2$

Источник: рисунки 1–5 составлены автором статьи.

Source: the diagrams 1–5 were drawn up by the author of the article.

Растяжение без тока (кривая 1) характеризуется максимальной прочностью и относительным удлинением бронзы, а также отсутствием скачков напряжения [19]. Введение импульсного тока снижает напряжения течения и относительное удлинение до разрушения и влияет на характер механического поведения. Деформационное упрочнение при скважности $Q = 100$ и 20 (кривые 2 и 3) сменяется деформационным разупрочнением при скважности $Q = 10$ (кривая 4). Кроме того, снижение скважности повышает температуру образцов, особенно сильно в слабо проводящем титане Grade 4, по сравнению с бронзой БрАЖ 9-4-4 (рис. 1b). Видно, что для достижения комнатной температуры (атермического ЭПЭ) необходимо повышать скважность более 1 000 и 5 000, соответственно для бронзы.

Рассмотрим влияние скважности на деформационное поведение при более высоких значениях $1\,000 \leq Q \leq 20\,000$. На рисунке 2 приведены кривые напряжение/деформация для медного сплава БрАЖ9-4-4, полученные при различных комбинациях скважности и плотности тока. Введение одиночных импульсов тока при постоянной длительности импульса вызывает появление скачков напряжения вниз разной амплитуды (от 10 до 120 МПа), зависящей от плотности и скважности тока. При высокой плотности тока 1 600 А/мм² уменьшение скважности от 20 000 до 15 000 практически не влияет на амплитуду скачка (кривые 2 и 3), но снижает относительное удлинение и повышает температуру образца с 70 до 80 °С.



Р и с. 2. Кривые напряжение/деформация для БрАЖ 9-4-4 при $\tau = 1\,000$ мкс:
1 – без тока; 2 – $j = 1\,600$ А/мм², $Q = 20\,000$; 3 – $j = 1\,600$ А/мм², $Q = 15\,000$;
4 – $Q = 20\,000$, $j = 450$ А/мм²; 5 – $Q = 100$, $j = 400$ А/мм².

Кривые 4 и 5 сдвинуты вверх на 50 МПа по оси Y , чтобы избежать наложения

F i g. 2. Stress/strain curves for Al bronze at $\tau = 1\,000$ μ s:

1 – no current; 2 – $j = 1\,600$ А/мм², $Q = 20\,000$; 3 – $j = 1\,600$ А/мм², $Q = 15\,000$;
4 – $Q = 20\,000$, $j = 450$ А/мм²; 5 – $Q = 100$, $j = 400$ А/мм².

Curves 4 and 5 are shifted up on 50 MPa along the Y axis to avoid overlap

При более низкой плотности тока 400–450 А/мм² скачки напряжения уменьшаются по амплитуде и даже исчезают со снижением скважности от 20 000 до 100 (кривые 4 и 5). В этом случае также происходит повышение температуры образца, но более значимое (на 40 °С).

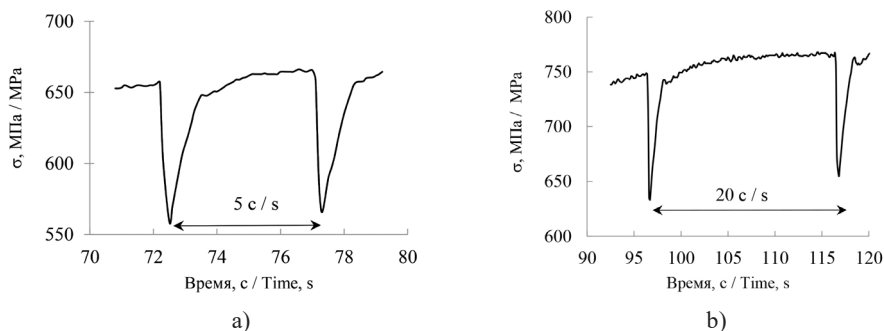


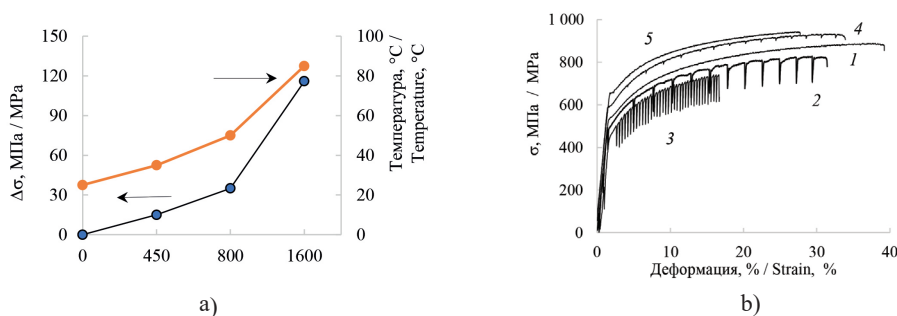
Рис. 3. Влияние скважности на форму и амплитуды скачка напряжений при $j = 1\,600\text{ А/мм}^2$ и $\tau = 1\,000\text{ мкс}$: а) $Q = 5\,000$; б) $Q = 20\,000$
 Fig. 3. Influence of duty cycle on shape and stress jump amplitude at $j = 1\,600\text{ А/мм}^2$ and $\tau = 1\,000\text{ }\mu\text{s}$: а) $Q = 5\,000$; б) $Q = 20\,000$

Отметим, что в данной статье наблюдающиеся скачки в упругой области не рассматриваются, поскольку их появление является следствием теплового расширения образца и не связано с ЭПЭ.

На рисунке 3 иллюстрируется влияние скважности при одинаковой плотности тока и длительности импульса на взаимное расположение скачков напряжения, а также их форму и амплитуду в бронзе БрАЖ9-4-4. Четырехкратное повышение скважности с 5 000 до 20 000 привело к слабому увеличению амплитуды скачка напряжений с 110 до 120 МПа и действующих напряжений течения. Независимо от скважности форма скачка напряжений является ассиметричной. Снижение напряжения в скачке (левая часть) происходит почти на порядок быстрее, чем его восстановление (правая часть).

Можно заключить, что скважность является критическим параметром ЭПЭ, регулирующим его проявление и влияющим на тепловой эффект тока.

Влияние плотности тока. На рисунке 4а на примере крупнозернистой оловянистой бронзы представлены кривые напряжение/деформация, полученные растяжением без тока и с током разной плотности, но одинаковой скважности.

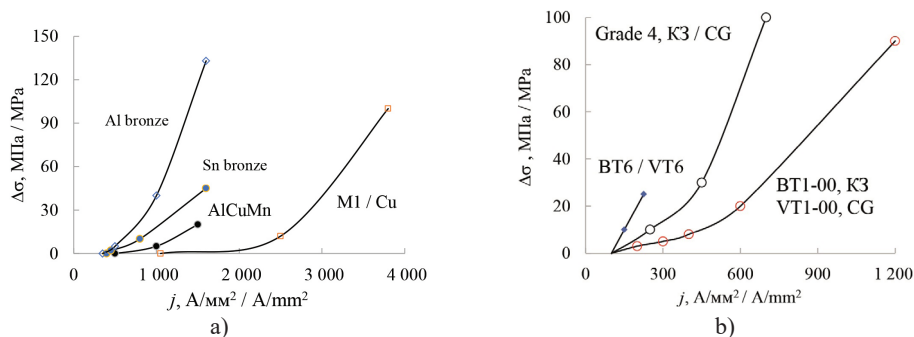


Р и с. 4. Кривые напряжение/деформация (а) и зависимость амплитуды скачка от плотности тока (б) бронзы БрОЖ6.5-0.15: 1 – без тока; 2 – 450 А/мм²; 3 – 800 А/мм²; 4 – 1 600 А/мм², $Q = 20\,000$, $\tau = 1\,000\text{ мкс}$. Кривые смещены по оси Y относительно друг друга на 5–15 МПа, чтобы исключить наложение

Fig. 4. Stress/strain curves (a) and jump amplitude on current density (b) for Al bronze: 1 – no current; 2 – 450 А/мм²; 3 – 800 А/мм²; 4 – 1 600 А/мм², $Q = 20\,000$, $\tau = 1\,000\text{ }\mu\text{s}$. Curves are shifted along the Y axis relative to each other by 5–15 МПа to prevent overlap

Поскольку кривые растяжения при многократном изменении плотности тока в реальном масштабе напряжений накладываются друг на друга, они были смещены относительно друг друга по оси Y так, чтобы можно было оценить амплитуду скачков. Типичные скачки напряжения, соответствующие ЭПЭ, появляются только при плотности тока выше $j_{кр} \geq 450$ А/мм² (кривая 2). Дальнейшее повышение плотности тока до 1 600 А/мм² способствовало увеличению амплитуды скачка напряжения от нескольких МПа до 40 МПа (кривые 3 и 4), снижению относительного удлинения на 10 % и практически не влияло на напряжения течения. На рисунке 4b показана зависимость амплитуды скачка напряжения от плотности тока и температуры.

Аналогичные испытания были выполнены для материалов, заметно отличающихся величиной удельного электросопротивления. Соответствующие зависимости амплитуды скачков напряжения от плотности тока показаны для сплавов на основе алюминия, меди (рис. 5a) и титана (рис. 5b). Все кривые носят экспоненциальный характер, отличающийся показателем степени. Видно, что для каждого материала существует своя критическая (пороговая) плотность тока $j_{кр}$, ниже которой ЭПЭ не проявляется, а выше этого значения амплитуда скачка повышается с увеличением плотности тока по экспоненте.



Р и с. 5. Влияние плотности тока на амплитуду скачка напряжения в КЗ материалах: а) сплавы на основе Al и Cu; б) титановые сплавы. Длительность импульса $\tau = 1\,000$ мкс, $Q = 30\,000$

Fig. 5. Current density effect on stress jump amplitude in CG materials:

a) Al and Cu based alloys; b) Ti based alloys. $\tau = 1\,000$ μ s, $Q = 30\,000$

Значения критической плотности тока показаны в таблице. Она наименьшая в слабо проводящих титановых сплавах Grade 4, BT1-00, BT6 (90–120 А/мм²) и наибольшая в высокопроводящей меди (около 1 000 А/мм²). В сплавах на основе меди и алюминия критическая плотность тока имеет промежуточные значения.

Т а б л и ц а

Table

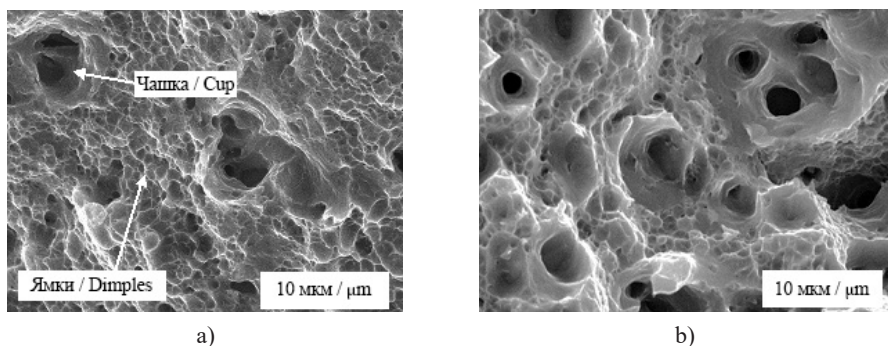
Критическая плотность тока (А/мм²) в материалах при $\tau = 1\,000$ мкс

Threshold current density (A/mm²) in materials at $\tau = 1\,000$ μ s

Состояние / State	BT1-00 / VT1-00	Grade 4	BT6 / VT6	Медь / Copper	БрАЖ 9 / Al bronze	БрОЖ6.5 / Sn bronze	AMr2 / Al ₆ Mg	Al ₂ Cu ₂ Mn
КЗ / CG	90	100	120	1 050	450	450	300	300
УМЗ / UFG	300	250	—	—	—	—	—	—

Роль структурного измельчения материалов также оказывает некоторое влияние на представленные зависимости. Так, в титановых сплавах ВТ1-00 и Grade 4 измельчение структуры приводит к слабому повышению критической плотности тока (табл.).

Фрактография. Фрактографические исследования образцов после растяжения без тока и с током разной скважности были выполнены для разных материалов. Для большинства исследованных материалов воздействие импульсного тока высокой плотности и скважности практически не оказывает влияние на характер излома, который остается вязким и отличается присутствием чашек и ямок отрыва (рис. 6а).



Р и с. 6. Изображения поверхности излома образца сплава АМг2: а) без тока; б) ток, $Q = 10$

F i g. 6. Fracture surface images in the Al_2Mg alloy: а) without current; б) current, $Q = 10$

Источник: рисунки получены автором с помощью микроскопа Tescan Mira 3 LMU в программе прибора и переведены в изображение в программе Paint.net.

Source: the images were made by the author using the microscope Tescan Mira 3 LMU in the device program and translated into pictures using the Paint.net program.

Однако снижение скважности импульсного тока приводит к увеличению доли чашек и появлению пор. Для примера на рисунке 6 показаны изображения изломов в растровом микроскопе для алюминиевого сплава АМг2. Видно, что введение импульсного тока низкой скважности способствует увеличению количества и размеров чашек в изломе, тогда как доля ямок заметно снижается (рис. 6б).

Обсуждение и заключение. Одним из важных результатов выполненного исследования является демонстрация влияния скважности импульсного тока на деформационное поведение и тепловой эффект. Было показано, что при вариации скважности в широком интервале значений в бронзе реализуется либо преимущественно тепловой электропластический эффект без скачков напряжения: $10 \leq Q \leq 100$ (рис. 1), либо атермический электропластический эффект со скачками напряжения: $Q \geq 1\,000$ (рис. 2). При высокой скважности тока ($Q \geq 20\,000$) деформационное поведение и механические характеристики прочности и пластичности приближаются к таковым для растяжения без тока. Преимущественно этот факт связан с отсутствием значительного повышения температуры образца. Другой возможной причиной может быть действие механизма электронного ветра, которое способствует релаксации напряжений

за счет аннигиляции возникающих при деформации новых дислокаций. Фактически скважность как характеристика тока является критическим параметром. Качественно близкие результаты были получены ранее для чистого титана [20] и алюминия [21].

Влияние плотности тока на амплитуду скачка напряжений и температуру образца носит экспоненциальный характер и свидетельствует о термоактивационных процессах в материалах (рис. 4b). Пороговый характер этого параметра в разных металлах был замечен ранее. Автор работы [22] показал, что критическая плотность тока возрастала с увеличением электропроводности материалов. Однако эти эксперименты были выполнены при ползучести под током и только для чистых металлов. Авторы недавнего исследования электропластического эффекта при растяжении титановых сплавов установили, что критическая плотность импульсного тока зависит от чистоты материала. Так, в технически чистом титане Grade 4 критическая плотность оказалась в два раза выше, чем в легированном титановом сплаве ВТ6 [23]. Результаты данного исследования подтверждают существование порогового значения плотности тока при квазистационарном растяжении, которое распространяется на группы сплавов с разной электропроводностью (рис. 5). Чем выше электропроводность и меньше размер зерен, тем выше пороговое значение плотности тока. Это наблюдение полезно для обоснования механизма электронного ветра и практического применения при обработке материалов давлением.

Параметры тока, исследованные выше, представляют собой важные и разные характеристики импульсного тока. Плотность тока связана с энергетической составляющей внешнего воздействия, тогда как скважность тока характеризует частотную составляющую импульсного тока. Оба параметра вместе определяют интенсивность распределения энергии импульса во времени. По своему воздействию на механическое поведение материалов они являются независимыми, но каждая из них влияет на температуру образца, по которому идет ток. Регулируя оба параметра, можно создавать условия, при которых тепловой эффект тока будет максимальным или отсутствовать. В большинстве случаев на практике используется режим, при котором происходит значительный нагрев деформируемого материала, что позволяет заменять термическую обработку обработкой током. В исследовательских целях часто появляется необходимость снижать тепловой эффект тока, чтобы определить вклад атермического (истинного) электропластического эффекта. В этой связи знание зависимостей температуры и деформационного поведения от указанных параметров становится актуальным.

Анализ формы скачков напряжения показал, что их профиль имеет асимметричность во времени (рис. 3). Асимметричность связана с разной скоростью теплопередачи при мгновенном объемном нагреве от импульса тока и замедленном поверхностном охлаждении образца. Подобные наблюдения подробно обсуждаются в работах [23; 24] и хорошо согласуются с асимметричным температурным профилем скачка [7]. Жесткость испытательной машины тоже может вносить определенный вклад в асимметрию формы скачка [25], которая в «мягких» машинах замедляет восстановление напряжения.

Полученные результаты исследования влияния параметров импульсного тока на особенности проявления электропластического эффекта в различных проводниковых материалах позволяют сделать следующие выводы:

1. Среди многих параметров импульсного тока, сопровождающих пластическую деформацию растяжением, скважность и плотность тока являются пороговыми. Это означает, что при превышении/снижении их критических значений электропластический эффект может появляться/исчезать или изменять атермический механизм на тепловой;

2. Пороговые значения обоих критических параметров тока зависят от электропроводности и микроструктуры материалов. С увеличением электропроводности и уменьшением размера зерен критическая плотность тока повышается. Атермический механизм электропластического эффекта в материалах с высокой электропроводностью достигается при меньших значениях скважности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldman P. D., Motowidlo L. R., Galligan J. M. The Absence of an Electroplastic Effect in Lead at 4.2K // *Scripta Metallurgica*. 1981. Vol. 15, Issue 4. P. 353–356. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(81\)90208-8](https://doi.org/10.1016/0036-9748(81)90208-8)
2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium // *Materials Science and Engineering*. 1980. Vol. 45, Issue 2. P. 109–116. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(80\)90216-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(80)90216-5)
3. Троицкий О. А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в «Журнал экспериментальной и теоретической физики». 1969. Т. 10. С.18–22. URL: https://jetpletters.ru/ps/852/article_13061.pdf (дата обращения: 10.03.2024).
4. Electroplasticity Effects: from Mechanism to Application / J. Liu [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131. P. 3267–3286. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12072-y>
5. Effect of Electrical Pulsing on Various Heat Treatments of 5XXX Series Aluminum Alloys / W. A. Salandro [et al.] // *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2008. Vol. 1. P. 283–292. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72512
6. Research Progress of Magnetic Field Regulated Mechanical Property of Solid Metal Materials / Y. Hu [et al.] // *Metals*. 2022. Vol. 12, Issue 11. Article no. 1988. <https://doi.org/10.3390/met12111988>
7. The Effect of Short Duration Electric Current on the Quasi-Static Tensile Behavior of Magnesium AZ31 Alloy / T. T. Nguyen [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Article no. 9560413. <https://doi.org/10.1155/2016/9560413>
8. Dobras D., Zimniak Z., Zwierzchowski M. The Effect of Pulsed Electric Current on the Structural and Mechanical Behavior of 6016 Aluminium Alloy in Different States of Hardening // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 23. Article no. 166. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00700-z>
9. The Effect of Direct Electric Current on the Plastic Behavior of AA7075 Aluminum Alloy in Different States of Hardening / D. Dobras [et al.] // *Materials*. 2021. Vol. 14, Issue 1. Article no. 73. <https://dx.doi.org/10.3390/ma14010073>
10. Троицкий О. А. Электропластический эффект в металлах // *Annali D'Italia*. 2021. № 26. С. 60–73. EDN: PWRSOB
11. Elucidating the Origin of Electroplasticity in Metallic Materials / M.-J. Kim [et al.] // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 21. Article no. 100874. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>
12. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the Mechanisms of Electroplasticity from a Crystal Plasticity Perspective // *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 27. Article no. 085006. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab43fc>



13. Excellent Ductility in the Extruded AZ61 Magnesium Alloy Tube Induced by Electropulsing Treatment during Tension / B. Jiang [et al.] // *Metals*. 2021. Vol. 11, Issue 5. Article no. 813. <https://doi.org/10.3390/met11050813>
14. Wu C., Zhou Y. J., Liu B. Experimental and Simulated Investigation of the Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Ti6554 Titanium Alloy During an Electropulsing-Assisted Microtension Process // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 838. Article no. 142745. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142745>
15. Stolyarov V. V., Misochenko A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials // *Materials*. 2023. Vol. 16, Issue 18. Article no. 6270. <https://doi.org/10.3390/ma16186270>
16. Understanding the Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Titanium Alloy During Electrically Assisted Plastic Deformation Process / F. Yin [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 869. Article no. 144815. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144815>
17. Annealing Behavior of Severely-Deformed Titanium Grade 4 / G. S. Dyakonov [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 742. P. 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.122>
18. Strength and Torsion Fracture Mechanism of Commercially Pure Titanium with Ultrafine-Grained Structure / G. V. Klevtsov [et al.] // *Letters on Materials*. 2021. Vol. 3. P. 273–278. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-3-273-278>
19. Effect of Pulsed Current Duty Factor on Deformation Behavior of Aluminum Bronze / M. A. Pakhomov [et al.] // *Metal Science and Heat Treatment*. 2023. Vol. 65. P. 292–297. <https://doi.org/10.1007/s11041-023-00928-9>
20. Stolyarov V. V. Role of the Pulse Current Duty Cycle during Titanium Tension // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023. Vol. 52, No. 4. P. 313–319. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.3103/S1052618823040167> (дата обращения: 10.03.2024).
21. Pakhomov M. A., Stolyarov V. V. Specific Features of Electroplastic Effect in Mono- and Polycrystalline Aluminum // *Metal Science and Heat Treatment*. 2021. Vol. 63. P. 236–242. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00677-7>
22. Conrad H. Electroplasticity in Metals and Ceramics // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 287, Issue 2. P. 276–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
23. Корольков О. Е., Пахомов М. А., Столяров В. В. Электропластический эффект в титановых сплавах при их растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 10. С. 73–82. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82>
24. Modeling of Thermal and Mechanical Behavior of a Magnesium Alloy AZ31 during Electrically-Assisted Micro-Tension / X. Wang [et al.] // *International Journal of Plasticity*. 2016. Vol. 85. P. 230–257. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.07.008>
25. Importance of Machine Compliance to Quantify Electro-Plastic Effect in Electric Pulse Aided Testing: An Experimental and Numerical Study / A. Subrahmanyam [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 75. P. 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.027>

REFERENCES

1. Goldman P.D., Motowidlo L.R., Galligan J.M. The Absence of an Electroplastic Effect in Lead at 4.2K. *Scripta Metallurgica*. 1981;15(4):353–356. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(81\)90208-8](https://doi.org/10.1016/0036-9748(81)90208-8)
2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium. *Materials Science and Engineering*. 1980;45:(2)109–116. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(80\)90216-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(80)90216-5)
3. Troitskii O.A. [Electromechanical Effect in Metals]. *Pisma v Zhurnal Experimentalnoi Teoricheskoi Fiziki*. 1969;10:18–20. (In Russ.) Available at: https://jetpletters.ru/ps/852/article_13061.pdf (accessed 10.03.2024).
4. Liu J., Jia D., Fu Y., Kong X., Lv Z., Zeng E., et al. Electroplasticity Effects: from Mechanism to Application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;131:3267–3286. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12072-y>

5. Salandro W.A., Jones J.J., McNeal T.A., Roth J.T., Hong S.-T., Smith M.T. Effect of Electrical Pulsing on Various Heat Treatments of 5XXX Series Aluminum Alloys. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2008;1:283–292. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72512
6. Hu Y., Zhao H., Yu X., Li J., Zhang B., Li T. Research Progress of Magnetic Field Regulated Mechanical Property of Solid Metal Materials. *Metals*. 2022;12(11):1988. <https://doi.org/10.3390/met12111988>
7. Nguyen T.T., Nguyen T.V., Hong S.-T., Kim M.-J., Han H.N., Morestin F. The Effect of Short Duration Electric Current on the Quasi-Static Tensile Behavior of Magnesium AZ31 Alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016;9560413. <https://doi.org/10.1155/2016/9560413>
8. Dobras D., Zimniak Z., Zwierzchowski M. The Effect of Pulsed Electric Current on the Structural and Mechanical Behavior of 6016 Aluminium Alloy in Different States of Hardening. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023;23:166. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00700-z>
9. Dobras D., Bruschi S., Simonetto E., Rutkowska-Gorczyca M., Ghiotti A. The Effect of Direct Electric Current on the Plastic Behavior of AA7075 Aluminum Alloy in Different States of Hardening. *Materials*. 2021;14(1):73. <https://dx.doi.org/10.3390/ma14010073>
10. Troitskiy O.A. Electroplastic Effect on Metals. *Annali D'Italia*. 2021;26:60–73. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: PWRSOB
11. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K. Elucidating the Origin of Electroplasticity in Metallic Materials. *Applied Materials Today*. 2020;21:100874. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>
12. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the Mechanisms of Electroplasticity from a Crystal Plasticity Perspective. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2019;27:085006. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab43fc>
13. Jiang B., Zhang D., Xu H., Liu Y., Cao Z., Yang X. Excellent Ductility in the Extruded AZ61 Magnesium Alloy Tube Induced by Electropulsing Treatment during Tension. *Metals*. 2021;11(5):813. <https://doi.org/10.3390/met11050813>
14. Wu C., Zhou Y.J., Liu B. Experimental and Simulated Investigation of the Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Ti6554 Titanium Alloy During an Electropulsing-Assisted Microtension Process. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;838:142745. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142745>
15. Stolyarov V.V., Misochenko A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials. *Materials*. 2023;16(18):6270. <https://doi.org/10.3390/ma16186270>
16. Yin F., Ma S., Hu S., Liu Y., Hua L., Cheng G.J. Understanding the Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Titanium Alloy During Electrically Assisted Plastic Deformation Process. *Materials Science and Engineering: A*. 2023;869:144815. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144815>
17. Dyakonov G.S., Mironov S., Enikeev N., Semenova I.P., Valiev R.Z., Semiatin S.L. Annealing Behavior of Severely-Deformed Titanium Grade 4. *Materials Science and Engineering: A*. 2019;742:89–101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.122>
18. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Klevtsova N.A., Fesenyuk M.V., Tyurkov M.N., Polyakov A.V. Strength and Torsion Fracture Mechanism of Commercially Pure Titanium with Ultrafine-Grained Structure. *Letters on Materials*. 2021;3:273–278. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-3-273-278>
19. Pakhomov M.A., Savenkov G.G., Smakovsky M.A., Stolyarov V.V. Effect of Pulsed Current Duty Factor on Deformation Behavior of Aluminum Bronze. *Metal Science and Heat Treatment*. 2023;65:292–297. <https://doi.org/10.1007/s11041-023-00928-9>
20. Stolyarov V.V. Role of the Pulse Current Duty Cycle during Titanium Tension. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023;52(4):313–319. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.3103/S1052618823040167> (accessed 10.03.2024).
21. Pakhomov M.A., Stolyarov V.V. Specific Features of Electroplastic Effect in Mono- and Polycrystalline Aluminum. *Metal Science and Heat Treatment*. 2021;63:236–242. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00677-7>
22. Conrad H. Electroplasticity in Metals and Ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;287(2):276–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
23. Korolkov O.E., Pakhomov M.A., Stolyarov V.V. [The Electroplastic Effect in Titanium Alloys



under Tension]. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2022;88(10):73–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82>

24. Wang X., Xu J., Shan D., Guo B., Cao J. Modeling of Thermal and Mechanical Behavior of a Magnesium Alloy AZ31 during Electrically-Assisted Micro-Tension. *International Journal of Plasticity*. 2016;85:230–257. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.07.008>

25. Subrahmanyam A., Shivaprasad C., Suman G., Raju D.V., Rahul K.V., Venkata R.N. Importance of Machine Compliance to Quantify Electro-Plastic Effect in Electric Pulse Aided Testing: An Experimental and Numerical Study. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;75:268–279. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.027>

Об авторе:

Столяров Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (101000, Российская Федерация, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7604-3961>, Researcher ID: A-1928-2014, Scopus ID: 7005641592, vlstol@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 25.03.2024; поступила после рецензирования 27.05.2024;
принята к публикации 03.06.2024*

About the author:

Vladimir V. Stolyarov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (4 Maly Kharitonievsky Lane, Moscow 101000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7604-3961>, Researcher ID: A-1928-2014, Scopus ID: 7005641592, vlstol@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Submitted 25.03.2024; revised 27.05.2024; accepted 03.06.2024



Теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда»

А. М. Пенджиев , П. О. Оразов

Туркменский государственный
архитектурно-строительный институт
(г. Ашгабат, Туркменистан)

 ampenjiyev@gmail.com

Аннотация

Введение. Использование экологически чистых инженерных систем, в частности солнечных энергетических технологий, способствует уменьшению энергозатрат, тем самым снижая себестоимость продукции и антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Цель исследования. С помощью инновационных методик оценить тепловые ресурсные потенциалы солнечного излучения; рассмотреть солевые залежи залива в качестве тепловых аккумуляторов для разработки, внедрения и применения солнечных теплоэнергетических технологий; обосновать технико-экономическую целесообразность их использования в инженерных системах в заливе Кара-Богаз-Гол (Каспийский регион).

Материалы и методы. Методология основана на систематизированных теоретических расчетах валовых, технических, экономических и экологических потенциалов солнечного излучения с учетом природно-климатических условий. Методика расчетов базируется на методах математического моделирования процессов тепло-массообмена в гелиотехнических системах при преобразовании солнечной энергии в тепловую в соленом водоеме залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда».

Результаты исследования. Оценены солнечно-энергетические характеристики для внедрения различных инженерных аккумулирующих систем и технологий. Определены результаты аккумуляирования в течение дня на солевой поверхности водоема: зимой – $1\,009,0\text{ Вт/м}^2\text{ сут.}$; летом – $1\,574,7\text{ Вт/м}^2\text{ сут.}$ Доказано, что солнечно-энергетический потенциал преобразования в тепловую энергию меняется в пределах от 40 до 70 % в зависимости от сезона года, по теоретическим расчетам КПД солнечного пруда зимой составляет 11,4 %; летом – 14,6 %. Измерена средняя температура в летний период на солевой поверхности дна водоема, она составляет от 55,04 до 79,8 °C, зимой от 20,0 до 25,6 °C.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследования вносят вклад в укрепление энергетической безопасности, развитие энергетических систем и производства автономных теплоэнергетических устройств на основе солнечной энергии, что снизит энергопотребление органического топлива и улучшит экологическую обстановку в регионе. Материалы статьи могут быть использованы при разработке проектно-сметной документации, составлении технико-экономического обоснования для создания различных солнечно-энергетических систем и технологий в Каспийском регионе.

Ключевые слова: солнечная теплоэнергетика, энергетические потенциалы, солнечный пруд, залив Кара-Богаз-Гол, Каспийское море, Туркменистан

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Пенджиев А. М., Оразов П. О., 2024



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

Для цитирования: Пенджиев А. М., Оразов П. О. Теплоэнергетические ресурсы потенциала залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 474–494. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.474-494>

Thermal Energy Resource Potentials of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “Solar Pond”

A. M. Penjiyev✉, P. O. Orazov

Turkmen State Architecture and Construction Institute (Ashgabat, Turkmenistan)

✉ ampenjiyev@gmail.com

Abstract

Introduction. The use of environmentally-friendly engineering systems including solar energy technologies makes it possible to reduce energy costs and therefore to lower production costs and anthropogenic stress on the environment.

Aim of the Study. The authors used innovative techniques to assess the thermal resource potential of solar radiation, to analyze the salt deposits of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as thermal accumulators for the development, introduction and use of solar thermal technologies and to justify the technical and economic feasibility of their use in engineering systems in the Kara-Bogaz-Gol Gulf (Caspian region).

Materials and Methods. The study design is based on systematic theoretical calculations of the gross, technical, economic and ecological potentials of solar radiation taking into account environmental conditions. For calculating there were used the methods of mathematical modeling of heat and mass transfer processes in active solar energy systems when converting solar energy into thermal energy in the salty reservoir of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “solar pond”.

Results. There have been assessed the solar energy characteristics for the introduction of various engineering storage systems and technologies. There have been determined the results of energy storage on the reservoir salt surface during the day: in winter – 1 009.0 W/m² per day, in summer – 1 574.7 W/m² per day. It has been proven that the potential of solar energy conversion into thermal energy varies from 40 to 70% depending on the season. According to theoretical calculations, the solar pond efficiency in winter is 11.4% and in summer – 14.6%. In summer, there was measured the average temperature on the salt surface of the reservoir bottom, it ranges from 55.04 to 79.8 °C, in winter from 20.0 to 25.6 °C.

Discussion and Conclusion. The results obtained can be used for strengthening energy security, developing energy systems and producing autonomous thermal power devices based on solar energy that will reduce the energy consumption of fossil fuels and improve the environmental situation in the region. The materials of the article can be used in preparing design estimates and feasibility study for developing various solar energy systems and technologies in the Caspian region.

Keywords: solar thermal power engineering, energy potentials, solar pond, Kara-Bogaz-Gol Gulf, Caspian Sea, Turkmenistan

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Penjiyev A.M., Orazov P.O. Thermal Energy Resource Potentials of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “Solar Pond”. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):474–494. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.474-494>

Введение. Эффективное использование возобновляемых энергетических ресурсов в различных отраслях промышленности и хозяйства способствует укреплению энергетической и экологической безопасности, энергетических систем и устойчивому развитию страны¹.

Применение энергии Солнца актуально для Туркменистана, так как по расчетам технический потенциал энергии Солнца эквивалентен $1,4 \cdot 10^9$ т у.т. в год. Одним из нетривиальных способов использования солнечной энергии являются «солнечные пруды» – соленые водоемы, в которых аккумулируется значительное количество тепловой энергии Солнца [1].

Предметом исследования является ресурсный потенциал солнечного излучения и солевые залежи залива Кара-Богаз-Гол как теплового аккумулятора.

Площадь залива Кара-Богаз-Гол составляет примерно 18 тыс. км², средняя глубина 4,7 м, концентрация глауберовой соли (мирабилит) от 310 до 350 ‰. Соль имеет следующие свойства: она белая с желтым или зеленым оттенком, черта имеет белый цвет, ее световые лучи просвечивают, твердость – 1,5–2; плотность – 1,49 г/см³. Химическая формула – $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Статус IMA – унаследованный минерал² [2].

Залив представляет для страны большой интерес, так как содержит в себе значительное количество химических элементов, использующихся в различных агропромышленных комплексах (АПК) и отраслях промышленности. Применение солнечных энергетических ресурсных потенциалов и аккумулярование тепла повысят энергоэффективность химического производства, уменьшат энергозатраты, тем самым снижат себестоимость продукции, сократят выбросы вредных частиц в биосферу и улучшат социально-бытовые условия населения.

Получение и использование химической продукции с помощью энергоэффективных систем и технологического оборудования для АПК на основе солнечной энергии является актуальной задачей в регионе [1].

Научным сообществом Туркменистана проделана большая исследовательская работа по использованию солнечной энергии: гелиоводонагревательные установки для горячего водоснабжения и кондиционирования воздуха; гелиотеплицы с грунтовыми биоаккумуляторами тепла, автономным энергообеспечением, замкнутым влагооборотом траншейного типа; гелиосушкилки для сыпучих продуктов, волокнистых пиломатериалов, овощей, фруктов и железобетонных изделий; гелиоустановки для выращивания микроводорослей спироулины, хлореллы и сценедесмуса; автономный животноводческий гелиоэнергетический комплекс; гелиомелиоративный комплекс для водоснабжения отгонного животноводства в пустыне Каракум; жилищно-производственный фотоэлектрический комплекс для создания электроэнергии, тепла, холода, горячей и опресненной воды; безотходный гелиобиотехнологический комплекс с автономным энергоснабжением, состоящий из гелиобиотеплицы, теплонасосной и биогазовой установок одновременного производства животноводческой или птицеводческой и сельскохозяйственной продукции

¹ Бердымухамедов Г. М. Туркменистан на пути достижения целей устойчивого развития. Ашхабад : Туркменская государственная издательская служба, 2018. 468 с.

² Булатов С. А. Энциклопедия географа. Залив Кара-Богаз-Гол [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3Bm2zs> (дата обращения: 25.01.2023).



по замкнутому циклу. В работах [1; 3] проведены теоретические и практические расчеты, проанализирована работа вышеуказанных установок и комплексов³.

Несмотря на многочисленные исследования по указанной проблематике, не выявлены валовые, технические, экономические и экологические потенциалы с использованием новой методики для энергоэффективного внедрения гелиоэнергетических технологий; не обоснована технико-экономическая целесообразность составления проектно-сметной документации, не рассмотрено математическое моделирование тепло-массообменных процессов аккумулирования с учетом природно-климатических и теплотехнических характеристик глауберовых солевых залежей, не учтены статистические показатели температуры солевого слоя для водоема Кара-Богаз-Гол⁴ [4].

Цель исследования – определить теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда».

Задача исследования – составить математическую модель тепло-массообмена, на основе которой определить потенциалы аккумулирования тепловой энергии и КПД залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда»; методами математической статистики определить корреляционную зависимость, составить уравнение регрессии для технико-экономического обоснования (ТЭО) с целью разработки, внедрения и использования различных солнечных тепловых инженерных технологий и систем в заливе Кара-Богаз-Гол в Каспийском регионе.

Обзор литературы. Использование солнечных прудов практикуется в мире уже не первый год. В настоящее время изучению и использованию тепловых ресурсов солнечных прудов уделяется большое внимание [5–7]. В работах В. И. Виссарионова, Дж. Даффа, С. Адилова, А. Монжези и других авторов представлены технологическая схема теплоэнергетической станции «солнечный пруд» и принцип работы электростанции «солнечный пруд», состоящий в поступлении горячей воды в испаритель (теплообменник) с парогенератором, который вращает электрогенератор⁵. Они доказали, что концентрация соли в придонном слое солнечного пруда в процессе нагревания увеличивается, так как соль в более теплой воде растворяется быстрее. Зафиксированы случаи, когда температура придонного соленого слоя достигала 110 °С [8–10].

Интерес ученых вызывают происходящие тепловые процессы с использованием солнечной энергии [6]. В свою очередь В. Дубковский, А. Денисова приводят примеры использования солнечных прудов в комбинированных энергоустановках с другими возобновляемыми источниками энергии для ресурсосбережения [11], а Ю. У. Умаров с коллегами в процессе изучения результатов экспериментальных

³ Использование солнечной энергии / под общ. ред. Л. Е. Рыбаковой. – Ашхабад : Ылым. 1985. 280 с.; Стребков Д. С., Пенджиев А. М., Мамедсахатов Б. Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. М. : ГНУ ВИЭСХ, 2012. 496 с.

⁴ Комплексный спутниковый мониторинг морей России : моногр. / Лаврова О. Ю. [и др.]. – М. : ИКИ РАН, 2011. 385 с. URL: <https://clck.ru/3Bm6JE> (дата обращения: 26.01.2023); Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, ч. 1–16. Л. : Гидрометиздат, 1989. 502 с. URL: https://elibrshu.ru/files_books/pdf/img-213102023.pdf (дата обращения: 25.01.2023).

⁵ Виссарионов В. И. Солнечная энергетика : учебное пособие для вузов / под общ. ред. В. И. Виссарионова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. 276 с. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12813/35694.pdf> (дата обращения: 26.01.2023); Даффи Дж. А. Основы солнечной теплоэнергетики. М. : Издательский дом Интеллект, 2013. 884 с.

исследований теплового режима соленого солнечного бассейна выявили, что согласно теоретическим данным, температурные показатели при увеличении солености воды до максимальной отметки могут быть повышены до 150 °С [12; 13].

Российские ученые, проанализировав тепловые характеристики и конвективную устойчивость солнечного пруда, привели обобщенную стационарную модель [14]. Также ряд авторов исследовали системы теплоснабжения на основе солнечных прудов в северной зоне Российской Федерации и пришли к выводу, что извлечение накопленного тепла для таких целей, как отопление помещений и производство электроэнергии, является одной из основных целей проектирования и строительства солнечных прудов. Разделение отвода тепла в солнечных прудах на два метода (метод прямого отвода и метод косвенного отвода тепла) обосновало перспективы строительства опытно-промышленного солнечного пруда в Крыму [11; 15].

Экспериментальные исследования по использованию «солнечных прудов» в качестве источника получения тепловой и электрической энергии проводились учеными США, Израиля, Италии, Японии, Венгрии. Так, Н. Sogukpinar, Q. Wu, Y. Rghif доказали, что в условиях насыщения температурный градиент, вызванный солнечной радиацией, приведет к градиенту концентрации, если в пруду присутствует достаточно соли для создания стабильного солнечного пруда. Равновесный солнечный пруд имеет следующие ключевые преимущества перед обычными водоемами:

1. Термическая эффективность равновесного пруда повышается за счет высокой концентрации в нижней части пруда;

2. Растворимость соли, используемой в равновесном солнечном пруду, увеличивается с температурой. Следовательно, нет необходимости регулярно поддерживать концентрацию соли. Некоторые соли, такие как нитрат калия (KNO_3), хлорид кальция (CaCl_2), бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), нитрат аммония (NH_4NO_3) и хлорид магния (MgCl_2), являются обычными растворенными веществами, используемыми в равновесных солнечных прудах;

3. Сравнительное исследование различных возобновляемых источников энергии, рассмотренных в этом исследовании, проиллюстрировано. Сравнялись источник энергии, зрелость, стоимость, эффективность, уникальные преимущества и ограничения источников энергии [16–18].

До сих пор не исследованы теплоэнергетические ресурсные потенциалы солнечного излучения в качестве аккумулирования тепловой энергии в соленом водоеме Кара-Богаз-Гол как «солнечном пруде»; не сформулированы рекомендации по реализации освоения возможностей гелиотехнологии в зависимости от природно-климатических условий с учетом экологических, экономических аспектов и технических ресурсов прикаспийской зоны Туркменистана⁶ [4].

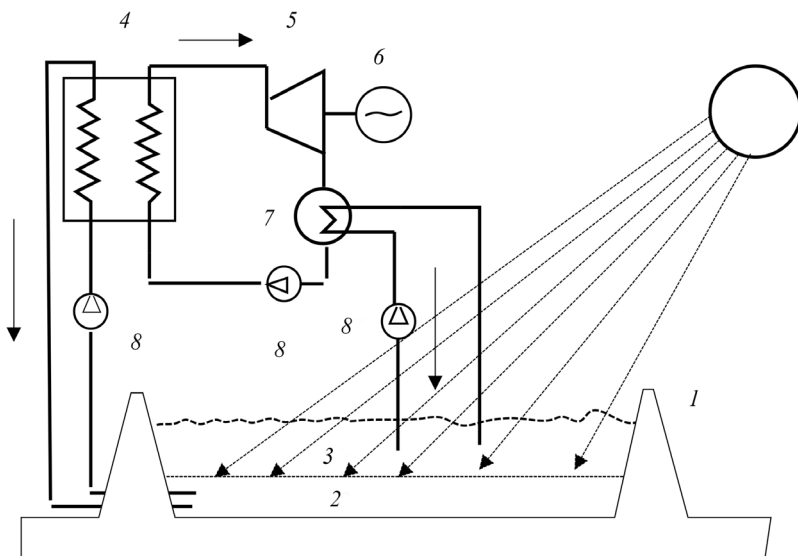
Для научного обоснования и систематизирования тепловых энергетических ресурсных потенциалов солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол по формализованной методике были рассмотрены длительность сияния Солнца по месяцам в течение года; средние рабочие температуры гелиоустановки и природной среды

⁶ Пенджиев А. М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии : моногр. М. : Русайнс, 2023. 400 с.

за месяц и год; альbedo поверхности гелиоустановки, доли рассеянного излучения, угловые параметры падения солнечной энергии на поверхности, нормально и наклонно ориентированные в течение месяца; удельный часовой угол движения склонения Солнца и наклона поверхности к горизонту.

Исходя из физического принципа и процесса тепло-массообмена, составлено дифференциальное уравнение теплового баланса водоема за промежуток времени. На основе уравнения рассчитаны суточный и годовой ход аккумулирования солевой залежи залива. Процесс преобразования солнечного излучения в тепловую энергию и ее аккумулирование является таким энергетическим явлением, как «солнечные пруды».

В настоящее время в мировой практике используется ряд соленых озер и морей с искусственными «солеными прудами» для производства тепла. Этот процесс относится к классу активных солнечных систем. В данном исследовании предлагаем возможность для строительства энергетической станции на принципах «солнечного пруда» в условиях залива Кара-Богаз-Гол. Технологическая схема теплоэнергетической станции «солнечный пруд» для Кара-Богаз-Гол представлена на рисунке 1.



Р и с. 1. Солнечная теплоэлектростанция на заливе Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд»:

1 – дамба; 2 – горячая вода с высокой концентрацией соли; 3 – охлажденная вода;
4 – теплообменник; 5 – турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – насосы

F i g. 1. Solar thermal power plant on the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “solar pond”:

1 – dam; 2 – hot water with a high salt concentration; 3 – chilled water; 4 – heat exchanger;
5 – turbine; 6 – electric generator; 7 – capacitor; 8 – pumps

Источник: составлено по схемам авторов В. И. Виссарионова, Дж. А. Даффи и Д. С. Стребкова⁷
Source: the diagram is compiled from the diagrams of Vissarionov V.I., Duffy J.A. and Strebkov D.C.

⁷ Виссарионов В. И. Солнечная энергетика : учебное пособие для вузов; Даффи Дж. А. Основы солнечной теплоэнергетики; Родионов В. Г. Энергетика : проблемы настоящего и возможности будущего. М. : ЭНАС, 2010. 352 с. URL: <https://click.ru/3Bm6wV> (дата обращения: 24.01.2023).

Работа электростанции по принципу «солнечного пруда» состоит из процесса поступления горячей воды из уровня 2 в испаритель (теплообменник) 4 с помощью насоса 8. Там находится парогенератор, в который идет низкотемпературный пар в турбину 5 (в виде низкокипящей жидкости). Турбина запускает движение электрогенератора 6. Затем пар отправляется в конденсатор 7, туда же поступает холодная вода из водоема 3 с помощью насоса 8. Схема функционирует в замкнутом цикле. Принцип работы рассмотренной системы не отличается от парогенераторных станций, где эффективность зависит от перепадов температуры между слоями горячей 2 и холодной 3 воды [15; 16].

Преимуществом использования естественного залива является отсутствие необходимости завоза соли, строительства необходимых сооружений, что снижает финансовые затраты.

Таким образом, тепловые ресурсные потенциалы солнечных соляных прудов могут стать дополнительным источником тепла, использующегося в различных отраслях промышленности, для снабжения населения в период отопительного сезона, а также служащего дополнительным источником низкопотенциального тепла для теплонасосных установок в наиболее холодный и летний периоды года в зоне залива Кара-Богаз-Гол.

Материалы исследования. *Гидрометеорологические особенности солнечного излучения в заливе.* Спектральная карта температуры поверхности Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол по данным ИК-изображения спутника NOAA-16 за март, апрель, август, октябрь приведена на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, температурный режим воды в заливе отличается от Каспийского моря. Если средняя температура воды моря составляет 13,5 °C в год, то в заливе она равна 16,9 °C. По сезонам года средний температурный режим залива изменяется от 0,9 °C зимой и до 26 °C летом. Максимальная температура воздуха летом доходит до 64 °C, средняя минимальная температура зимой снижается до 3 °C⁸ [2].

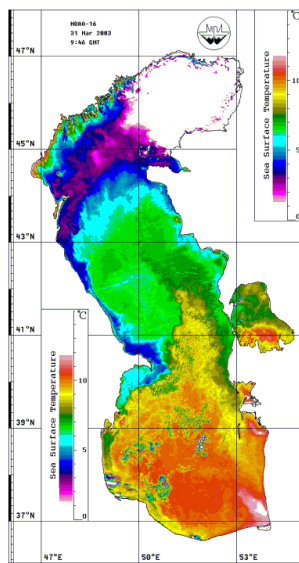
По результатам гидрометеорологического анализа построен график изменения температуры воды, скорости ветра, продолжительности солнечного сияния, количества пасмурных дней и осадков по месяцам года. Графическое изображение приведено на рисунке 3⁹.

Из графика видно, что среднemesячный ветровой режим меняется по сезонам года: в зимний период скорость ветра повышается и составляет в среднем 6,2 м/с, а летом снижается до 5,7 м/с.

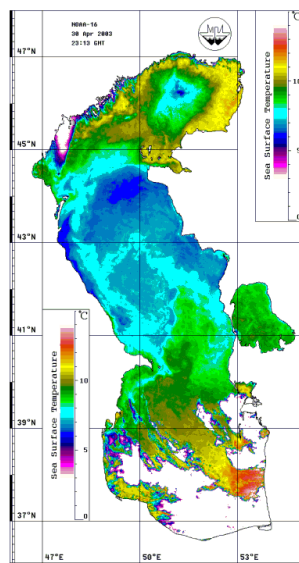
Количество осадков на территории залива в среднем составляет 104 мм в течение года, в месяц – 8,7 мм. За год продолжительность солнечного сияния составляет в среднем 2 674 ч, в сутки – около 7,8 ч, несолнечных дней – 32.

⁸ Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.].

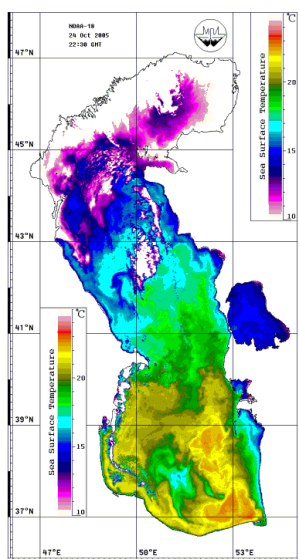
⁹ Там же; Научно-прикладной справочник по климату СССР; Булатов С. А. Энциклопедия географа. Залив Кара-Богаз-Гол [Электронный ресурс]. URL: <https://elck.ru/3Bm2zs> (дата обращения: 25.01.2023).



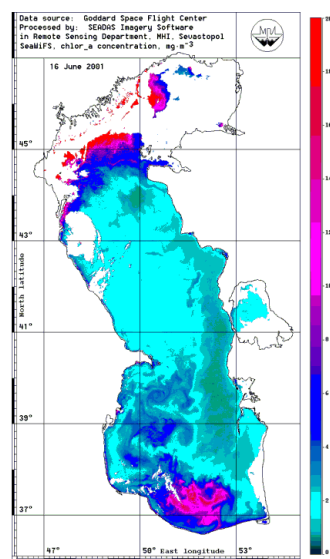
a)



b)



c)



d)

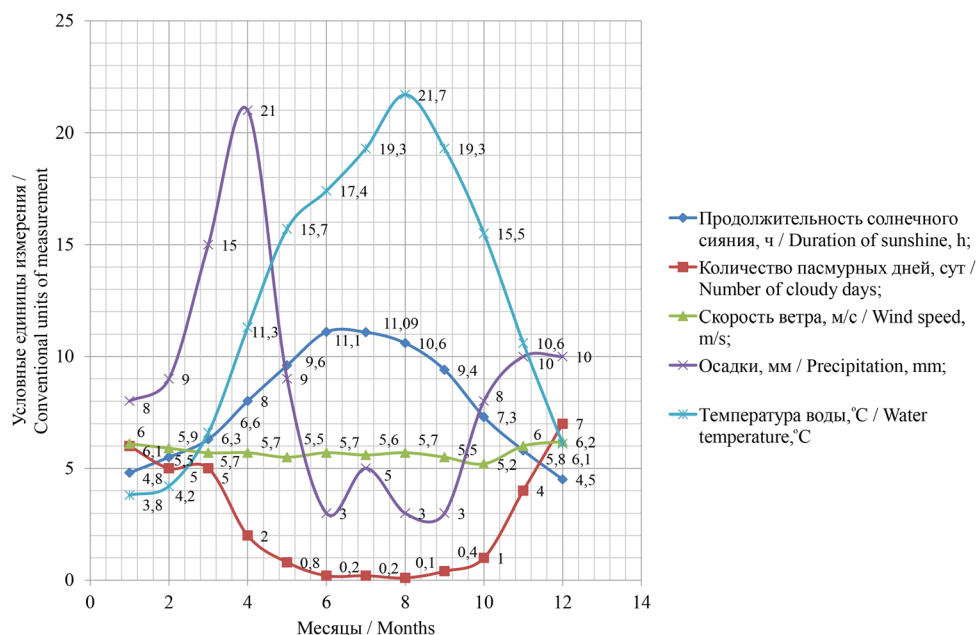
Р и с. 2. Атлас температуры поверхности Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол по данным ИК-изображения спутника NOAA-16 на: а) март; б) апрель; в) август; д) октябрь

F i g. 2. Atlas of surface temperature of the Caspian Sea and the Kara-Bogaz-Gol Bay from IR image data made by the NOAA-16 satellite for: a) March; b) April; c) August; d) October

Источник: составлено авторами по¹⁰ [2].

Source: the diagram is compiled according by the authors [2].

¹⁰ Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.].
Instruments and methods of experimental physics



Р и с. 3. Гидрометеорологический анализ залива Кара-Богаз-Гол по месяцам года
 Fig. 3. Hydrometeorological analysis of the Kara-Bogaz-Gol Gulf by month of the year

Источник: составлено авторами статьи.

Source: the diagram is compiled according to the authors.

Методика оценки теплоэнергетических ресурсных потенциалов солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол. Методика определения валового потенциала основана как на суммарной интенсивности поступления солнечного излучения, так и на географических, природно-климатических и атмосферных явлениях, при этом альбедо является однородным по всей площади залива Кара-Богаз-Гол. Фиксировались расчетные и полученные исходные данные: среднемноголетний приход солнечного излучения на горизонтальную поверхность; месторасположение и широта местности; астрономический часовой пояс и направление угла; продолжительность солнечного сияния и угол склонения в течение года; валовый, технический и экономический потенциалы; коэффициенты альбедо, отражения, теплопроводности, пропускания в зависимости от угла склонения и многие другие экономические и экологические показатели. Данный метод был выбран для исследования в силу его наибольшей точности в условиях данного климата.

Исследуя многолетние гидро- и метеонаблюдения по справочникам и данным Гидрометеослужбы с учетом неблагоприятных атмосферных явлений в регионе Кара-Богаз-Гол, выяснили, что сумма валового потенциала или годового прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность составляет $1\,685,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год. При этом небольшая нижняя облачность снижает поступление солнечной радиации на 27–35 % и увеличивает на 25–40 % при рассеянной радиации, а годовое

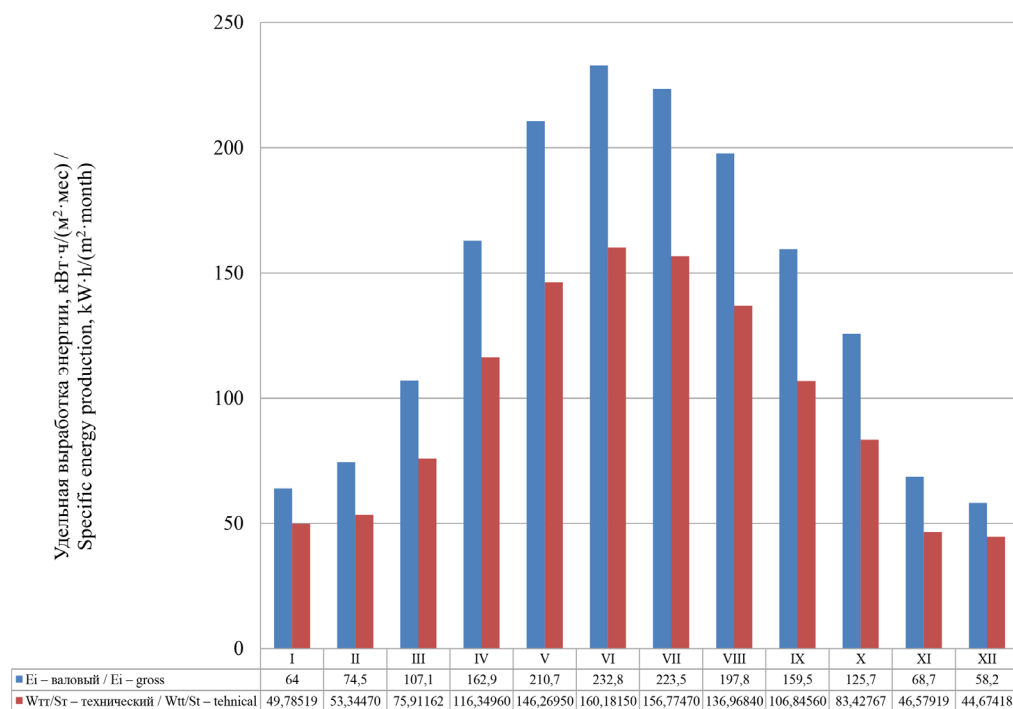
поступление суммарной солнечной радиации в реальных условиях облачности снижается на 13–19 % на территории залива¹¹.

Подробная методика определения технического, экономического и экологического потенциалов с учетом различных вариантов преобразования в тепловую и электрическую энергии представлена в работах [3; 4].

Технический потенциал гелиоизлучения в районе залива – средняя суммарная энергия в течение одного года, изученная при соблюдении всех экологических норм, с применением новейших методик расчета при высоком уровне инновационных технологий.

Технический потенциал солнечного излучения – это сумма технических потенциалов, которые с помощью водонагревателей при КПД 50 % преобразуются в тепловую энергию, равную 1 381,6 кВт·ч/м² в год [1; 3].

На рисунке 4 представлена гистограмма валового и технического потенциалов преобразования солнечного излучения в тепловую энергию по месяцам года.



Р и с. 4. Распределение валового и технического потенциала солнечной энергии, преобразованной в тепловую энергию в заливе Кара-Богаз-Гол по месяцам на 1 м²

F i g. 4. Distribution of the gross and technical potential of solar energy converted into thermal energy in the Kara-Bogaz-Gol Gulf by month per 1 square meter

Источник: составлено авторами статьи.

Source: the diagram is compiled according by the authors.

¹¹ Пенджиев А. М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии. *Instruments and methods of experimental physics*

Экономический потенциал залива – выработка тепловой энергии от суммарного солнечного излучения, составляющая 552,6 кг у.т./м² в год для данного региона с учетом существующего уровня цен на энергию, получаемую от традиционных источников при условии выполнения экологических требований [1; 3].

Экологический потенциал является частью технического потенциала, который целесообразно преобразовать в полезную энергию при существующем уровне вредных выбросов в атмосферу, при переработке ископаемого органического топлива в тепловую энергию и другие виды энергии [1; 3].

Солнечная энергия, по сравнению с традиционными видами энергии, обладает возможностью обеспечить экологическую чистоту установок и улучшить экологическую обстановку [2; 5]. Из сумм экономических потенциалов тепловой энергии при преобразовании в нее солнечного излучения складывается экологический потенциал гелиоэнергии [1; 3; 23].

В таблице показано потенциальное сокращение вредных выбросов в атмосферу при эксплуатации тепловых водонагревателей в районе залива Кара-Богаз-Гол.

Т а б л и ц а

T a b l e

Энергетические, технические, экономические и экологические показатели сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду при использовании солнечных водонагревателей [23]

Energy, technical, economic and environmental indicators for reducing emissions of harmful substances into the environment when using solar water heaters [23]

Валовые ресурсы солнечного излучения, кВт·ч/(м ² ·год) / Gross resources of solar radiation, kWh/(m ² ·year)	Потенциалы / Potentials		Антропогенные нагрузки вредных веществ, кг/(м ² год) / Anthropogenic loads of harmful substances, kg/(m ² year)					
	Технический эквивалент выработки, кВт·ч/(м ² ·год) / Technical equivalent of output, kWh/(m ² ·year)	Экономия расхода топлива, кг у.т./м ² ·год) / Fuel consumption savings, equivalent fuel kg/(m ² ·year)	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	CO ₂	Твердых веществ / Solids
1 978,3	1 381,6	552,6	11,5	6,2	0,79	1,69	883,7	1,17

Теплоэнергетические расчеты работы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда». Теплоэнергетические особенности работы «солнечного пруда» заключаются в следующем: солнечное излучение поступает на водную поверхность водоема, часть отражается в окружающую среду, часть проникает в водоем и попадает на солевую поверхность дна, частично отражаясь от солевого слоя, часть солнечного излучения проникает в солевой слой, тем самым преобразовываясь в тепловую энергию. Другими словами, часть солнечного излучения аккумулируется. Такое тепловое явление называется «солнечным прудом» [15; 16].

Процесс формирования теплоэнергетического режима аккумуляирования в соленом водоеме очень сложный. Однако в отдельных случаях и при введении ряда упрощающих допущений можно осуществить количественный анализ формирования термических условий в солевых залежах на дне залива.

В водоеме на процесс формирования температурных условий в соленой воде, на аккумуляирование в солевых залежах на дне залива влияет большое количество факторов: метеорологические факторы – солнечное излучение, температура воздуха и воды, скорость ветра, облачность и т. д.; термическая характеристика соли и почвы – теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность, альbedo поверхности водоема и солевые залежи; теплотехнические характеристики водоема – кратность объема, плотность, воздухообмен, прозрачность в видимом и инфракрасном частях спектра. Следовательно, определение температур воздуха, воды, соли проводилось с учетом всех перечисленных факторов.

Согласно данным гидротехнических исследований, по динамике теплообмена можно сформулировать основные черты упрощенной модели: водоем как система в пространстве, однородно заполненная хорошо перемешанной соленой водой, полуограниченный водяной массив; боковые ограждения с нулевой теплоемкостью; солнечное излучение равномерно распространяется по воздушному, водному и солевому пространствам залива.

Динамика тепло- и массообмена в солнечном соленом водоеме. Солнечный соленый водоем Кара-Богаз-Гол рассматриваем как «солнечный пруд», физический принцип динамики тепло- и массообмена работы которого заключается в следующем: солнечное излучение поступает на поверхность водоема, часть отражается, часть проникает в низко-конвертированную зону, аккумулирует тепловую энергию в соленом растворе, часть тепла уходит в грунт. Часть тепловой энергии с поверхности водоема уходит в окружающую среду за счет конвективного теплообмена, лучистого излучения и испарения.

На формирование динамики процесса тепло- и массообмена в солнечном соленом водоеме оказывают большое влияние разнообразные факторы:

- гидрометеорологические – солнечное излучение (q_b^*), продолжительность и время солнечного сияния, облачность (μ), температура воздуха окружающей среды (T_n), водоема (T_b), солевого слоя (T_c) и почвы (T_n), скорость ветра (v) и некоторые другие параметры;

- теплотехнические, термические, физические и химические свойства соли водоема: теплопроводность воды (λ_b), соли (λ_c); теплоемкость воды (c_b), соли (c_c); плотность воды (ρ_b), соли (ρ_c); температура поверхности воды (a_b), соли (a_c); альbedo поверхности воды (r_b), (r_c) и другие параметры.

При исследовании динамики процесса тепло- и массообмена учтены все вышеприведенные основные факторы. Расчет тепло- и массообмена солнечного водоема связан в совокупности с температурным режимом воды, воздуха, поверхности соли, отложенной на дне водоема, с временем изменений по месяцам в течение года.

Разработка рабочей математической модели. Неоднократно проводились научные исследования по математическому моделированию тепловых процессов солнечно-энергетических установок, но применительно к соленому водоему

залива Кара-Богаз-Гол и с учетом природно-климатических условий Каспийского побережья по месяцам в течение года динамика процесса тепло- массообмена не рассматривалась.

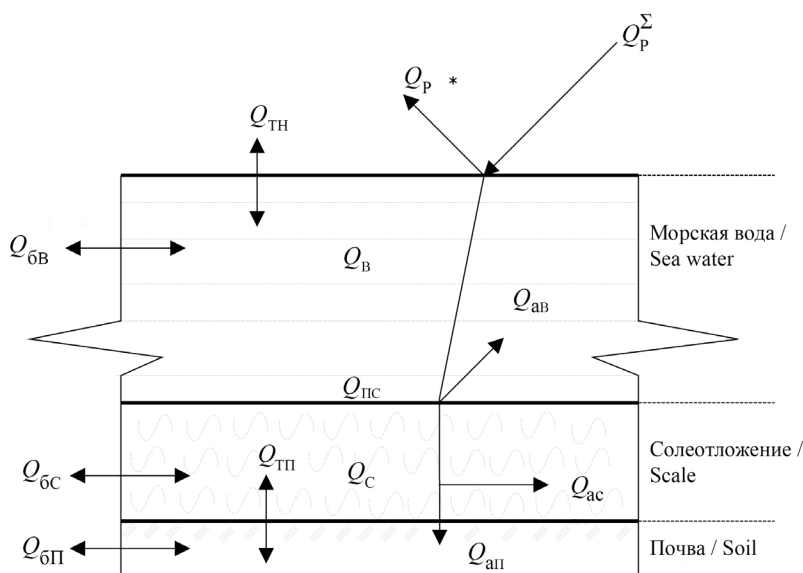
Возможность решения задачи динамики процесса тепло- массообмена солнечного залива изучали на основе физической модели. Проект рабочей математической модели производили с некоторыми упрощениями:

– солнечный залив рассматривался как система, состоящая в некотором пространстве одномерном и однородном с соленой водой, с ограниченным массивом в объеме 1 м^3 ;

– система обогрева предполагает, что солнечное излучение равномерно распределено по всему объему водоема на 1 м^2 ;

– динамика системы тепло- и массообмена описана в виде дифференциального уравнения теплового баланса за промежуток времени.

Физическое представление динамики процесса тепло- и массообмена в одномерном пространстве приведено на рисунке 5.



Р и с. 5. Одномерная расчетная физическая модель тепло- и массообмена в заливе Кара-Богаз-Гол

F i g. 5. One-dimensional computational physical model of heat and mass transfer in the Kara-Bogaz-Gol Gulf

Источник: схема составлена авторами статьи.

Source: the diagram is compiled according by the authors.

Солнечные излучения, аккумулированные в искусственном или естественном соленом водоеме, рассматриваются как водяные солнечные коллекторы, называемые «солнечными прудами». Основным условием функционирования такой системы является наличие градиента концентрации соли по толще воды в неглубоких водоемах.



Описание дифференциального уравнения теплового баланса. На основе физического принципа и процесса тепло- массообмена составлено и рассмотрено дифференциальное уравнение теплового энергетического баланса залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» за промежуток времени, dt . Оно имеет вид:

$$dQ_p^\Sigma - dQ_c - dQ_b - dQ_{th} - dQ_{ab} - dQ_{ac} - dQ_{gr} = 0, \quad (1)$$

где dQ_p^Σ – суммарный поток тепла солнечного излучения, поступающий в соленый водоем, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_{ab} – поток солнечного излучения, который аккумулируется в водном объеме, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_c – поток солнечного излучения, поглощенный солевой поверхностью дна пруда и почвой + dQ_{Π} , $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_b – поток солнечного излучения, поступающий на водную поверхность водоема, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_{th} – количество тепла, отдаваемое в атмосферу с поверхности в результате воздухообмена и теплопередачи, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_{gr} – количество тепла, отдаваемое в боковые грунтовые поверхности водоема в одномерном пространстве на 1 м^2 , объем не учитываем, $dQ_{gr} \approx 0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_{ac} – поток солнечного излучения, аккумулированный в солевом слое на дне, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ [22].

Подставляем составляющие в значения к величинам dQ_p^Σ , dQ_b , dQ_c , dQ_{ac} , dQ_{ab} балансового дифференциального уравнения (1) и представляем их в виде:

$$\begin{aligned} dQ_p &= (1 - r_b) F \cdot q^* (\tau) d\tau, \\ dQ_c &= c_c \gamma_c \xi_c \rho_c F [T_c (\tau) - T_b (\tau)] d\tau, \\ dQ_b &= c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [T_b (\tau) - T_h (\tau)] d\tau, \\ dQ_{th} &= c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [T_b (\tau) - T_h (\tau)] d\tau, \\ dQ_{ab} &= c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F dT_b (\tau), \\ dQ_{ac} &= c_c \gamma_c \rho_c F dT_c (\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

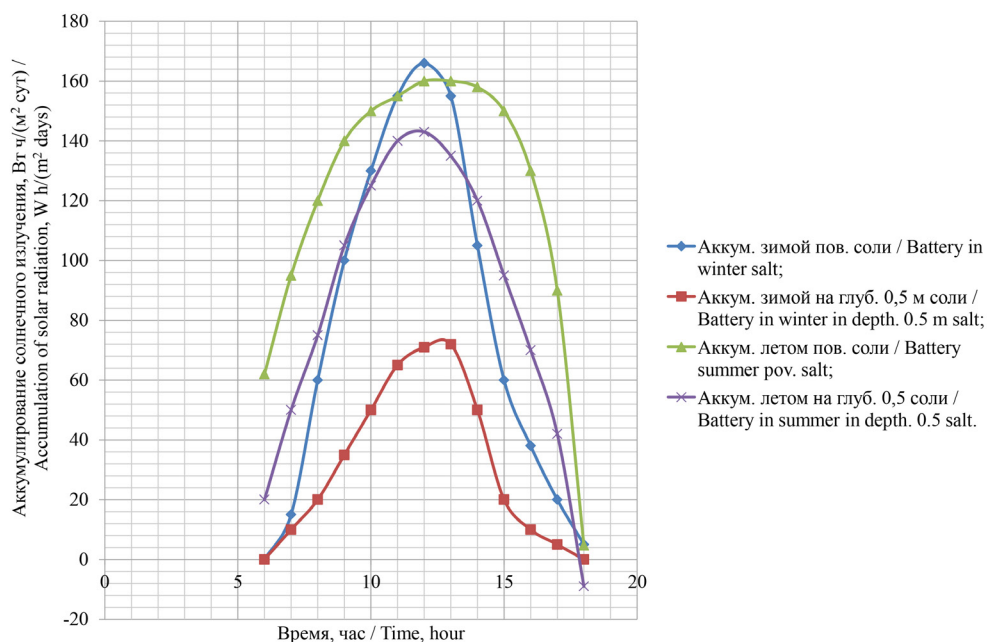
где F – площадь водоема, м^2 ; $\rho_{b,c}$ – плотность воды, соли, $\text{кг}/\text{м}^3$; ξ_b – кратность воздухообмена с поверхности водоема; $r_{b,c}$ – альбеда воды, поверхность соли; $c_{c,b}$ – объемная теплоемкость соленой воды, воздуха, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$; $\gamma_{c,b}$ – плотность соленой воды, воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; q^* – поток солнечного излучения на горизонтальную поверхность, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; T_h – температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$; T_b – температура воды водоема, $^\circ\text{C}$.

Проделав некоторые аппроксимации степенными полиномами в том же интервале времени с применением преобразования Лапласа и другие математические преобразования, находим температурный режим солевого слоя в водоеме T_c $^\circ\text{C}$, получаем в виде периодического гармоничного ряда:

$$T_c = T_{0c} + \sum_{j=1}^n T_{jc} \exp \left[i \left(\omega \tau - \varphi_j \right) \right],$$

где T_{oc} – среднее значение температуры соленой воды водоема, °C; T_{jc} – амплитуда температуры солевого слоя, °C для j – гармоники; $i = \sqrt{-1}$ – мнимое число; ω – циклическая частота внешнего теплового воздействия соленой воды на солевой слой, °C/ч; τ – время, час; ϕ_j – угол сдвига фаз, радиус. Более детальные расчеты содержатся в работах¹³ [22].

Результаты исследования. На основе составленного теплового балансового уравнения (1) рассчитан термический режим залива как «солнечного пруда» (8). Определены суточный температурный режим на поверхности солевого слоя и на глубине 0,5 м. С помощью формулы (2) обозначили аккумулятирование солнечной энергии в летний и зимний периоды года. Аккумулятирование в соленой поверхности и на глубине 0,5 м солеотложения показано на рисунке 6.



Р и с. 6. Суточный ход аккумулятирования солнечного излучения в заливе Кара-Богаз-Гол

F i g. 6. Daily variation of solar radiation accumulation in the Kara-Bogaz-Gol Gulf

Источни́к: составлено авторами статьи.

Source: the diagram is compiled according to the authors.

В течение дня солнечное излучение аккумулятируется на солевой поверхности и составляет: зимой – 1 009,0 Вт/м² сут. или в среднем – 77,6 Вт/м² сут.; летом – 1 574,7 Вт/м² сут. или в среднем 121,1 Вт/м² сут.; на глубине 0,5 м равно: зимой – 408,0 Вт/м² сут. или в среднем 31,4 Вт/м² сут.; летом – 1 111,0 Вт/м² сут. или в среднем 85,5 Вт/м² сут.

¹³ Пенджиев А. М. Научное обоснование использования энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии в Туркменистане.

Температура на солевой поверхности зимой составляет от 3,8 до 31,5 °С; летом – от 14,3 до 55,04 °С. Температура на глубине 0,5 м солевой поверхности зимой изменяется в пределах от 3,8 до 15,76 °С; летом – от 7,16 до 27,52 °С. Процесс аккумулирования солнечной энергии связан с температурой прогрева солевой поверхности, которая меняется по сезонам года. Полученные научные исследования соответствуют законам теплофизики и адекватно воспроизводят результаты составленного дифференциального уравнения теплового баланса для промежутка времени.

Статистические показатели для составления ТЭО. Разработка, составление проектно-сметной документации и внедрение солнечных энергетических станций вызывает необходимость технико-экономического обоснования (ТЭО), которое поможет спрогнозировать и определить рентабельность энергетических технологий и их энергоэффективность для потребителя.

Основываясь на методах математической статистики, расчетных результатах мы получили уравнения регрессии и коэффициент корреляции для прогнозирования потенциалов солнечного излучения при преобразовании в тепловую энергию (y), в зависимости от температуры воды и количества аккумулирования солнечной энергии на солевой поверхности (x) и на глубине 0,5 м.

Рассматриваем уравнение регрессии $y = a + bx$, в котором a – начальная ордината, дающая значение y при $x = 0$; b – коэффициент регрессии, он демонстрирует изменение величины y в среднем при изменении x на единицу [2; 5; 6].

На основе многолетних данных солнечного излучения, падающего на поверхность водоема Кара-Богаз-Гол, уравнение регрессии и коэффициент корреляции зимой и летом составляют:

$$\text{зимой на поверхности соли: } y = -4,3956x + 327,75; R^2 = 0,0082;$$

$$\text{летом на поверхности соли: } y = -1,044x + 599,45; R^2 = 0,0002.$$

Зависимость экономических и технических показателей от гелиоизлучения, взятого в среднем за много лет наблюдений, его трансформация в энергию, причем показатели были взяты по месяцам года в регионе Кара-Богаз-Гол, имеет следующий вид:

$$\text{валовый: } y = -0,3332x + 160,19, R^2 = 0,0003;$$

$$\text{технический в тепловую: } y = -0,7073x + 112,64, R^2 = 0,0027;$$

$$\begin{aligned} &\text{удельные энергетические параметры солнечной тепловой:} \\ &y = -0,1797x + 116,02, R^2 = 0,0002. \end{aligned}$$

Уравнение регрессии и коэффициент корреляции для аккумулирования солнечной энергии на поверхности и глубине 0,5 м соли в водоеме зимой и летом имеют следующий вид:

$$\text{зимой на поверхности соли: } y = -1,1154x + 91; R^2 = 0,0051;$$

$$\text{летом на поверхности соли: } y = -1,5264x + 139,45; R^2 = 0,0161;$$

$$\text{зимой на глубине 0,5 м: } y = -0,5659x + 38,176; R^2 = 0,0066;$$

$$\text{летом на глубине 0,5 м: } y = -1,533x + 103,86; R^2 = 0,0149.$$

Мы получили уравнение регрессии технического потенциала и удельные энергопараметры гелиоизлучения (y), которое, накапливая энергию Солнца в соленом водоеме, преобразует ее в тепловую (x). Данная регрессия поможет специалистам в прогнозировании создания различных технологических установок на основе солнечной энергии и при составлении соответствующей проектной документации и ТЭО для строительства их в регионе Кара-Богаз-Гол.

Обсуждение и заключение. Путем теоретической систематизации информации научных исследований в области использования гелиоустановок, по формализованной методике определены потенциальные возможности и объем снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду при условии использования энергетических гелиоустановок для получения тепловой энергии [2].

Полученные научные результаты базируются на физических законах, процессах тепло- и массообмена, математическом анализе залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда», что адекватно воспроизводят результаты математической модели.

Предварительные технико-экономические расчеты показывают, что использование естественного соленого водоема Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» снизит затраты на различные механизированные мероприятия при строительстве гидросооружения, искусственной теплоизоляции дна водоема, так как это существенно повышает себестоимость преобразования тепла. Расчеты, приведенные на рисунках 3 и 4, подтверждают способность достижения необходимой температуры рассола для осуществления снабжения потребителя теплом [17–19]. Результаты показывают, что аккумулялирование солнечной энергии зимой в сутки на глубине 0,5 м в среднем составляет 31,4 Вт/м² сут., летом – 85,5 Вт/м² сут. На солевую поверхность в среднем поступает солнечная энергия: летом – 586,9 Вт ч/м² сут., зимой – 275,0 Вт ч/м² сут. По предварительным расчетам, летом на 1 км² залива можно получить 60 м³ воды со средней температурой 75,0 °С, а зимой – 25,0 °С. Полученные результаты также могут быть использованы в сочетании с тепловыми насосами, данные расчеты могут применяться и на меньшей глубине.

Если обеспечить поступление тепла 60 Вт/м², то вполне достижимо снабжение населения горячей водой в течение года [20–22].

Применение таких методов при строительстве солнечных прудов в рассматриваемом районе более предпочтительно, поскольку при этом не требуются:

- финансовые затраты на строительство котлована, так как залив представляет собой природный бассейн со средней глубиной 4,7 м;
- закупка соли (в заливе создана необходимая концентрация рассола);
- создание службы контроля за процессом содержания соли при снижении температуры.

Все вышеперечисленное существенно снижает эксплуатационные расходы.

На основе исследований и полученных результатов делаем следующие выводы:

- научно обоснованы теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда», валовые, технические, экономические и экологи-



ческие показатели от преобразования солнечной энергии в тепловую соответственно составят: 1 978,3 кВт·ч/(м² год); 1 381,7 кВт·ч/(м² год); 552,6 кг у.т.; сокращение выбросов вредных компонентов в атмосферу с 1 м²/кг в год составят: SO₂ – 11,50; NO_x – 6,22; CO – 0,79; CH₄ – 1,88; CO₂ – 803,73; твердых веществ – 1,17;

– на основе расчета составленной математической модели тепло-массообмена потенциалы аккумулирования тепловой энергии составляют зимой 1 009,0 Вт/м² сут., летом – 1 574,7 Вт/м² сут., меняется от 40–70 % в зависимости от сезона года; средняя температура в летний период на солевой поверхности дна поднимается от 55,04 до 79,8 °С, зимой – от 20,0 до 25,6 °С, а КПД аккумулирования глауберовой соли в заливе составит: зимой – 11,4 %, летом – 14,6 %.

Полученные в исследовании научные результаты могут быть с успехом применены для составления проектно-сметной документации и технико-экономического обоснования разработки и внедрения различных систем на основе теплоэнергетических ресурсных потенциалов, в частности, солнечной энергии. Эффективное использование рассматриваемого нами залива Кара-Богаз-Гол в качестве «солнечного пруда» значительно повысит условия жизни местного населения, так как появятся новые рабочие места, улучшится экологическая обстановка в регионе, снизится антропогенная нагрузка на окружающую среду. Все это будет способствовать укреплению экономики и «зеленому» экологическому и социальному развитию страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пенджиев А. М. Экоэнергетический потенциал Туркменистана // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 16–18. С. 133–147. <https://doi.org/10.15518/isjaec.2017.16-18.133-147>
2. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S. Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution // Aquatic Geochemistry. 2009. Vol. 15. P. 223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>
3. Пенджиев А. М., Астанов Н. Г. Теоретические и методические расчеты потенциалов солнечно-энергетических ресурсов на Юго-Восточных Каракумах // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 7 (147). С. 65–86. EDN: SCLGTX
4. Penjiyev A. M. Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan // Applied Solar Energy. 2022. Vol. 58. P. 306–310. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22020141>
5. Rghif Y., Colarossi D., Principi P. Salt Gradient Solar Pond as a Thermal Energy Storage System: A Review from Current Gaps to Future Prospects // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 61. Article no. 106776. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106776>
6. Dincer I., Erdemir D. Solar Pond Systems // Solar Ponds: Systems and Applications. 2023. P. 83–122. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45457-8_3
7. Odilova S., Sharipova Z., Azam S. Investing in the Future: A Systematic Literature Review on Renewable Energy and its Impact on Financial Returns // International Journal of Energy Economics and Policy. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 329–337. <https://doi.org/10.32479/ijecp.14375>
8. Пенджиев А. М., Оразов П. О. Солнечный город – Аркадаг // Инженерные системы и сооружения. 2023. № 2 (52). С. 30–38. EDN: MVBRCY
9. Перспективы строительства опытно-промышленного солнечного пруда в Крыму / О. С. Попель [и др.] // Энергетическое строительство. 1992. № 2. С. 9–14.
10. Sodha M. S., Tiwari G. N., Nayak J. K. Shallow Solar Pond Water Heater: An Analytical Study // Energy Conversion and Management. 1981. Vol. 21, Issue 2. P. 137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2)

11. Дубковский В., Денисова А. Использование солнечных прудов в комбинированных энергоустановках // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2000. № 2. С. 11–13. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/5426/> (дата обращения: 25.06.2024).
12. Некоторые результаты теоретического и экспериментального исследования теплового режима соляного солнечного бассейна / Ю. У. Умаров [и др.] // Гелиотехника. 1973. № 2. С. 60–65.
13. Monjezi A. A., Campbell A. N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Temperature Distribution in a Solar Pond Under Mediterranean Conditions // Solar Energy. 2016. Vol. 135. P. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
14. Advances in Solar Pond Technology and Prospects of Efficiency Improvement Methods / O. V. Mbelu [et al.] // Sustainable Energy Research. 2024. Vol. 11. Article no. 18. <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00111-5>
15. Finite Element Modelling of the Thermal Performance of Salinity Gradient Solar Ponds / A. Anagnostopoulos [et al.] // Energy, 2020. Vol. 203. Article no. 117861. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117861>
16. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material / M. R. Assari [et al.] // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 53. Article no. 102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
17. The Investigation of Heat Storage Efficiency of Salt Gradient Solar Pond with and Without Phase Changing Materials / H. Sogukpinar [et al.] // Environmental Progress & Sustainable Energy. 2023. Vol. 42, Issue 4. Article no. e14085. <https://doi.org/10.1002/ep.14085>
18. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material / M. R. Assari [et al.] // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 53. Article no. 102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
19. Monjezi A. A., Campbell A. N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Temperature Distribution in a Solar Pond under Mediterranean Conditions // Solar Energy. 2016. Vol. 135. P. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
20. Adediji Y. A Review of Analysis of Structural Deformation of Solar Photovoltaic System under Wind-Wave Load // Engineering Archive. 2022. <https://doi.org/10.31224/2273>
21. The Application of an Enhanced Salinity-Gradient Solar Pond with Nucleation Matrix in Lithium Extraction from Zabuye Salt Lake in Tibet / Q. Wu [et al.] // Solar Energy. 2022. Vol. 244. P. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.031>
22. Пенджиев А. М. Математическое моделирование микроклимата в солнечной теплице траншейного типа // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 7. С. 88–96. URL: <https://clck.ru/3Bi4fy> (дата обращения: 25.06.2024).
23. Пенджиев А. М. Основы геоинформационной системы в развитии солнечной энергетики Туркменистана // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. 2015. № 12. С. 29–45. URL: <https://clck.ru/3BmGZu> (дата обращения: 25.06.2024).

REFERENCES

1. Penjiyev A.M. Eco-Energy Potential of Turkmenistan. *Alternative Energy and Ecology*. 2017; 16–18:133–147. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.133-147>
2. Kosarev A.N., Kostianoy A.G., Zonn I.S. Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution. *Aquatic Geochemistry*. 2009;15:223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>
3. Penjiyev A.M., Astanov N.G. Theoretical and Methodical Calculations of Potential of Solar Power Resources on Southeast Karakum. *Alternative Energy and Ecology*. 2014;7(147):65–86. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: SCLGTX
4. Penjiyev A.M. Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan. *Applied Solar Energy*. 2022;58:306–310. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22020141>



5. Rghif Y., Colarossi D., Principi P. Salt Gradient Solar Pond as a Thermal Energy Storage System: A Review from Current Gaps to Future Prospects. *Journal of Energy Storage*. 2023;61:106776. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106776>
6. Dincer I., Erdemir D. Solar Pond Systems. *Solar Ponds: Systems and Applications*. 2023;83–122. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45457-8_3
7. Odilova S., Sharipova Z., Azam S. Investing in the Future: A Systematic Literature Review on Renewable Energy and its Impact on Financial Returns. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2023;13(4):329–337. <https://doi.org/10.32479/ijee.14375>
8. Penjiyev A.M., Orazov P.O. Sunny City – Arkadag. *Engineering Systems and Structures*. 2023;2(52):30–38. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **MVBRCY**
9. Popel O.S., Sonina N.M., Yaskin L.A., Zenkova I.A. Prospects for the Construction of a Pilot Industrial Solar Pond in Crimea. *Energy Construction*. 1992;2:9–14. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Sodha M.S., Tiwari G.N., Nayak J.K. Shallow Solar Pond Water Heater: An Analytical Study. *Energy Conversion and Management*. 1981;21(2):137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2)
11. Dubkovsky V., Denisova A. [Use of Solar Ponds in Combined Power Plants]. *Ecotechnologies and Resource Conservation*. 2000;2:11–13. (In Russ.) Available at: <https://www.nkj.ru/archive/articles/5426/> (accessed 25.06.2024).
12. Umarov Yu.U., Teslenko J.H., Eliseev V.N., Umarov G.Ya. [Some Results of a Theoretical and Experimental Study of the Thermal Regime of a Salt Solar Pool]. *Solar Technology*. (In Russ.) 1973;2:60–65.
13. Monjezi A.A., Campbell A.N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Distribution in a Solar Pond Under Mediterranean Conditions. *Solar Energy*. 2016;135:297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
14. Mbelu O.V., Adeyinka A.M., Yahya D.I., Adediji Y.B., Njoku H. Advances in Solar Pond Technology and Prospects of Efficiency Improvement Methods. *Sustainable Energy Research*. 2024;11:18. <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00111-5>
15. Anagnostopoulos A., Sebastia-Saez D., Campbell A.N., Arellano-Garcia H. Finite Element Modeling of the Thermal Performance of Salinity Gradient Solar Ponds. *Energy*. 2020;203:117861. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117861>
16. Assari M.R., Beik A.J.G., Eydi R., Tabrizi H.B. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53:102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
17. Sogukpinar H., Bozkurt I., Genc, Z.K., Karakilcik M. The Investigation of Heat Storage Efficiency of Salt Gradient Solar Pond with and Without Phase Changing Materials. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2023;42(4):e14085. <https://doi.org/10.1002/ep.14085>
18. Assari M.R., Beik A.J.G., Eydi R., Tabrizi H.B. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53:102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
19. Monjezi A.A., Campbell A.N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Distribution in a Solar Pond under Mediterranean Conditions. *Solar Energy*. 2016;135:297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
20. Adediji Y. A Review of Analysis of Structural Deformation of Solar Photovoltaic System under Wind-Wave Load. *Engineering Archive*. 2022. <https://doi.org/10.31224/2273>
21. Wu Q., Yu J., Bu L., Nie Z., Wang Y., Renchen N., et al. The Application of an Enhanced Salinity-Gradient Solar Pond with Nucleation Matrix in Lithium Extraction from Zabuye Salt Lake in Tibet. *Solar Energy*. 2022;244:104–114. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.031>
22. Penjiyev A.M. Mathematical Modeling of the Microclimate in Solar Hot-House Deepof Type. *ISSAEE*. 2010;7:88–96. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3Bi4fy> (accessed 25.06.2024).
23. Penjiyev A.M. [Osnovnye Geoinformacionnye Sistemy v Razvitiit Solnechnoj Jenergetiki Turkmenistana]. *A Science. Thought: Electronic Periodic Journal*. 2015;12:29–45. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3BmGZu> (accessed 25.06.2024).

Об авторах:

Пенджиев Ахмет Мырадович, доктор технических наук, доктор сельскохозяйственных наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов Туркменского государственного архитектурно-строительного института (744025, Туркменистан, г. Ашхабад, ул. Б. Аннанова, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6584-5851>, Scopus ID: 57203910120, ampenjiyev@gmail.com

Оразов Парахат Оразмухамедович, кандидат технических наук, ректор Туркменского государственного архитектурно-строительного института. (744025, Туркменистан, г. Ашхабад, ул. Б. Аннанова, 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8361-4523>, tdbgi@online.tm

Заявленный вклад авторов:

А. М. Пенджиев – формирование основной концепции, научное руководство, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, корректировка литературного анализа, доработка текста.

П. О. Оразов – анализ результатов исследований и обсуждение, формирование и корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 20.11.2023; поступила после рецензирования 22.01.2024;
принята к публикации 29.01.2024*

About the author:

Ahmet M. Penjiyev, Dr.Sci. (Eng.), Dr.Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Turkmen State Institute of Architecture and Construction (1 B. Annanova St., 744025 Ashgabat, Turkmenistan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6584-5851>, Scopus ID: 57203910120, ampenjiyev@gmail.com

Parahat O. Orazov, Cand.Sci. (Eng.), Rector, Turkmen State Institute of Architecture and Construction (1 B. Annanova St., 744025 Ashgabat, Turkmenistan), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8361-4523>, tdbgi@online.tm

Authors contribution:

A. M. Penjiyev – developing the basic concept, academic advising, formulating goals and objectives of the study, making calculations, preparing the text, the literary analysis, finalizing the text.

P. O. Orazov – analysis and discussion of the study results, developing the study conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 20.11.2024; revised 22.01.2024; accepted 29.01.2024

ОПТИКА / OPTICS

Оригинальная статья / Original article

УДК 535:681.7.068.1

doi: [10.15507/2658-4123.034.202403.495-515](https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.495-515)



Влияние микроизгиба на поле и энергию слабонаправляющего оптоволокна с градиентным профилем в одномодовом режиме

В. А. Гладких, В. Д. Власенко✉

Вычислительный центр ДВО РАН –

обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН

(г. Хабаровск, Российская Федерация)

✉ vlasenko@as.khb.ru

Аннотация

Введение. Оптические волокна широко используются для передачи сигналов связи с высокой пропускной способностью на большие расстояния. Ключевым свойством, обеспечивающим такую производительность, является низкое затухание, при котором сигналы испытывают минимальные потери мощности, распределяясь вдоль оптического волокна. Одним из факторов, влияющих на потерю мощности при передаче информации, является механический изгиб волокна. Изгиб может увеличить потери передачи мощности оптическим волокном как за счет макроизгиба, так и микроизгиба. Исследование зависимости потерь при изгибе от параметров волновода позволяет контролировать потери оптического волокна при передаче информации.

Цель исследования. Оценить влияние микроизгиба на поле и энергию слабонаправляющего оптоволокна с градиентным профилем показателя преломления в одномодовом режиме.

Материалы и методы. Из уравнений для полей прямого и изогнутого участков слабонаправляющего оптоволокна для произвольного градиентного профиля показателя преломления последующим решением неоднородных уравнений Гельмгольца методом функции Грина получено выражение для относительной энергии: отношения энергии поля изогнутого участка оптоволокна к энергии поля прямого участка оптоволокна (в первом приближении для одномодового режима).

Результаты исследования. Полученное выражение для относительной энергии зависит от двух параметров – волноводного параметра и отношения радиуса оптоволокна к радиусу кривизны. Для квадратичного случая степенного профиля, как наиболее приближенного к реально используемому, численными расчетами построены зависимости относительной энергии от критериев, характеризующих изгиб для разных значений волноводного параметра.

Обсуждение и заключение. Показано, что в случае микроизгиба, чем больше длина волны или меньше радиус волокна, тем меньше потери. Полученные результаты могут быть использованы как в расчетах профилей оптического волокна, предназначенных для работы в изогнутом состоянии и исключающих дорогостоящее экспериментальное моделирование световодов, так и при конструировании волноводов для решения конкретных приложений, в частности, для повышения энергоэффективности, надежности и работоспособности средства измерения.

© Гладких В. А., Власенко В. Д., 2024



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

Ключевые слова: слабонаправляющее оптоволокно, одномодовый режим, микроизгиб, градиентный профиль показателя преломления, уравнение Гельмгольца, функция Грина, относительная энергия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Для цитирования: Гладких В. А., Власенко В. Д. Влияние микроизгиба на поле и энергию слабонаправляющего оптоволокна с градиентным профилем в одномодовом режиме // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 495–515. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.495-515>

Micro-Bending Effect on the Field and Energy of Weakly Guiding Optical Fiber with a Gradient Profile in Single-Mode Regime

V. A. Gladkikh, V. D. Vlasenko✉

Computer Center of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences
(Khabarovsk, Russian Federation)

✉ vlasenko@as.khb.ru

Abstract

Introduction. Optical fibers are widely used for high-bandwidth transmitting communication signals over long distances. The key feature enabling this performance is signal low attenuation, that is signals experience minimal power loss propagating along the optical fiber. One of the factors influencing power loss during information transmission is the fiber bending. Bending can increase the signal transmission power loss of an optical fiber because of both macrobending and microbending. Studying the dependence of signal power losses when bending on waveguide parameters makes it possible to control the signal power losses of an optical fiber during information transmission.

Aim of the Study. The study is aimed at evaluating the effect of microbending on the field and energy of a weakly guiding optical fiber with a gradient refractive index profile in a single-mode regime.

Materials and Methods. From the equations for the fields of straight and curved sections of weakly guiding fiber for an arbitrary gradient profile of the refractive index with the help of the subsequent solution of inhomogeneous Helmholtz equations by the Green's function method, there were obtained expressions for relative energy: the ratio of the field energy of the fiber curved section to the field energy of the fiber straight section (in the first approximation for a single-mode regime).

Results. The obtained expression for the relative energy depends on two parameters: the waveguide parameter and the ratio of the optical fiber radius to the radius of curvature. For the quadratic case of a power-law profile, as the closest to the actually used one, numerical calculations were used to construct the dependences of the relative energy on the parameter characterizing the bending for different values of the waveguide parameter.

Discussion and Conclusion. It has been shown that in the case of microbending, the longer the wavelength or the smaller the fiber radius, the lower the losses. The results obtained can be used in calculating optical fiber profiles designed to operate in a bent state and eliminate expensive experimental modeling of light guides and in designing waveguides to solve specific applications, in particular, to increase energy efficiency, reliability and performance of the measuring instruments.

Keywords: weakly guiding optical fiber, single-mode regime, micro-bending, graded index, Helmholtz equation, Green's function, relative energy

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

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

For citation: Gladkikh V.A., Vlasenko V.D. Micro-Bending Effect on the Field and Energy of Weakly Guiding Optical Fiber with a Gradient Profile in Single-Mode Regime. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):495–515. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.495-515>

Введение. При изгибе оптического волокна появляются дополнительные потери энергии, быстро растущие после достижения определенного критического радиуса изгиба. Этот критический радиус может быть очень мал (всего несколько мм) у волокон с высокой числовой апертурой, тогда как допустимый радиус изгиба гораздо больше (часто десятки см) для волокон в одномодовом режиме с большой площадью поперечной моды.

Даже при отсутствии макроскопических изгибов волокна могут быть потери, вызванные микроизгибами, то есть микроскопическими неровностями (нарушениями структуры) в волокне.

Замечено, что изгибы являются также причиной уменьшения эффективной площади поперечной моды. Это особенно заметно у волокон со ступенчатым профилем, которые имеют большую площадь поперечной моды. Также изгибы вызывает двойное лучепреломление.

Нарушение требования минимального радиуса изгиба может привести к ухудшению рабочих свойств кабеля. Радиус изгиба оптического кабеля оказывает влияние на радиус изгиба оптического волокна, находящегося непосредственно внутри кабеля. При соблюдении минимального радиуса изгиба оптического волокна не нарушается принцип передачи оптического сигнала: эффект полного внутреннего отражения сохраняется, сигнал без лишнего затухания передается по оптическим волокнам. Когда минимальный радиус изгиба оптического волокна не соблюдается, на месте изгиба возникает макроизгиб, при котором свет выходит за пределы сердцевины волокна и затухает. Излишнее затухание в линии недопустимо, поэтому соблюдение минимально допустимого радиуса изгиба кабеля является обязательным условием при эксплуатации волоконно-оптической линии связи.

Целью работы является исследование зависимости энергии внутри волокна от радиуса изгиба слабонаправляющего оптоволокна с градиентным профилем показателя преломления в одномодовом режиме с различными значениями волнового параметра при малых изгибах.

Обзор литературы. В классических монографиях А. Снайдера, Дж. Лава¹ и Х. Г. Унгера² представлена обширная информация о различных видах волноводов с кратким описанием как экспериментальных и теоретических результатов с большим количеством примеров, так и различных математических методов. Однако прошло немало времени с момента издания этих трудов. Исследование данной тематики значительно продвинулось. Отметим кратко некоторые направления.

¹ Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / пер. с англ. под ред. Е. М. Дианова, В. В. Шевченко. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.

² Унгер Х. Г. Планные и волоконные оптические волноводы / пер. с англ. под ред. В. В. Шевченко. М.: Мир, 1980. 656 с.

В монографии К. Okamoto³ доказано, что искривление одномодового оптического волокна приводит к двум основным формам дополнительных потерь при передаче: переходные потери и чистые потери на изгибе. Переходные потери и связанное с ними лучевое излучение, которое наблюдается в начале изгиба, могут быть объяснены с помощью модифицированной теории связанных мод [1]. Проблема потерь в волоконных световодах на изгибах малого радиуса возникла с их появлением. Одним из методов теоретического решения этой проблемы является метод конформного отображения изогнутого световода в прямолинейный с перекошенным профилем показателя преломления [2–4].

В работах [5; 6] предложен механизм полезный для настройки профиля поля в одномодовых оптических волокнах, предполагающий локальный и постоянный изгиб волокна с радиусом изгиба в несколько сотен мкм. В публикациях [7–9] представлен новый подход к разработке оптических волокон с градиентным профилем. В статье [10] рассмотрен круглый в поперечном сечении регулярный слабопроводящий волоконный световод с двойной оболочкой. Для одномодового режима такого волновода получено выражение, которое может дать оценку части мощности поля моды, проникающей во внешнюю сплошную оболочку, в стандартном подходе и в Гауссовой модели.

Новый и простой подход к разработке двумерного датчика смещения, основанный на потерях в макроизгибе и эффекте связи оптической мощности, представлен в работах [11–13]. В статье [14] рассмотрена проблема улучшения технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей, определяемых механической надежностью изогнутого оптического волокна. Установлена зависимость интенсивности светового потока от изменения радиуса изгиба оптического волокна. В статье [15] для степенного профиля с произвольным показателем степени в первом приближении методом функции Грина получено выражение для поля внутри градиентного волокна в одномодовом режиме.

Подходы к разработке оптических волокон и потери на изгибах исследованы в работах [16–18]. В статье [19] рассмотрен математический аппарат, позволяющий сформировать критерии качественной и количественной оценки несанкционированного доступа к построенным волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) на основе определения показателей эффективности отвода оптического излучения из волоконных световодов. Один из простейших и очевидных методов «съема» информации можно осуществить путем отведения мощности оптического излучения из ВОЛС за счет макроизгиба его волоконных световодов.

В работе [20] численно и экспериментально исследовано расщепление линий резонатора Фабри-Перо, образованного участком стандартного изогнутого одномодового волоконного световода с металлизированными торцами. Публикация [21] посвящена характеристике профиля пучка, выходящего из оптического волокна с двойной оболочкой и имеющего разную геометрию сечения. В работе [22] рассмотрен слабонаправляющий градиентный световод в одномодовом режиме, решено уравнение для электрического поля в сердцевине световода в общем виде в первом приближении.

³ Okamoto K. Fundamentals of Optical Waveguides. Elsevier Inc, 2006. 561 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-525096-2.X5000-4>

Волоконная брэгговская решетка представляет собой широко используемую чувствительную структуру оптического волокна. В работе [23] представлена простая структура, состоящая из обычного одномодового волокна и секции многомодового волокна с волоконной брэгговской решеткой. Она может одновременно осуществлять двухпараметрическое измерение микроизгиба и температуры. Различные аспекты оптических потерь на изгибах световодов подробно описаны в работах [24–26]. В публикациях [27–29] рассмотрен новый подход к моделированию оптического волокна. В обзоре [30] представлены результаты системного анализа существующих рекомендаций по волоконным световодам. Проведена систематизация физических параметров и эксплуатационных характеристик стандартизированных волоконных световодов.

Обеспечение малых потерь на границе соединения волокна с поллой сердцевинной и традиционного волокна с твердой сердцевиной имеет большое значение для многих практических применений волокон с твердой сердцевиной. В работе [31] с помощью моста в виде волокна с градиентом показателя преломления исследуется высокотемпературное соединение оптических волокон двух типов – антирезонансного волокна с поллой сердцевиной и волокна с твердой сердцевиной, обеспечивающих малые потери при прохождении лазерного излучения.

Пучки или жгуты оптических волокон находят все больше применений в различных областях волоконной оптики, несмотря на сравнительно низкое разрешение подобных устройств. Одним из способов решения указанной проблемы является использование материалов с высоким показателем преломления, что позволит добиться сильной локализации мод излучения в волокне. В обзоре [32] представлен способ применения для этих целей сапфировых волокон с высоким показателем преломления $n > 3$.

Волоконная оптика как научное направление начала активно развиваться с момента разработки технологии волоконных световодов. Научный интерес к изгибу оптоволокна возник практически вместе с появлением самих световодов. Изгиб оптического волокна является важным инструментом научных исследований в лазерной физике, оптической связи, технике обработки информации, оптических вычислительных машинах, оптических датчиках различных физических величин и т. д. Основываясь на анализе рассмотренных публикаций, делаем вывод, что большинство вопросов, связанных с изгибами оптического волокна, изучены недостаточно полно и требуют дополнительных исследований и экспериментов.

Материалы и методы. Пусть $\vec{E}$ – электрическое поле прямого поляризованного участка по оси x слабонаправляющего световода с постоянной распространения основной моды β :

$$\vec{E}_{str}(t, x, y, z) = \vec{e}_x \exp(-i\omega t) \exp(i\beta z) A_{str}(r). \quad (1)$$

Здесь ось z направлена вдоль оси световода; $(x; y)$ – координаты поперечного сечения; ω – циклическая частота; $\vec{e}_x$ – единичный вектор вдоль оси x ; $A_{str}(r)$ – координатная часть электрического поля прямолинейного участка световода, где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

Согласно уравнениям Максвелла для диэлектрических прозрачных сред, $A_{str}(r)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению в декартовых координатах:

$$\left(\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + [k^2 n^2(r) - \beta^2]\right) A_{str}(r) = 0, \quad (2)$$

где $k = \omega/c$; c – скорость света; $n^2(r)$ – показатель преломления волоконного световода, который обычно записывается в виде:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_{co}^2 [1 - 2\Delta h(r)] = n_{co}^2 - (V/k\rho)^2 h(r), & 0 \leq r \leq \rho, \quad h(0) \equiv 0, \quad h(\rho) = 1, \\ n_{cl}^2, & r > \rho, \end{cases} \quad (3)$$

$$2\Delta \equiv (n_{co}^2 - n_{cl}^2)/n_{co}^2 \equiv (NA)^2/n_{co}^2, \quad V \equiv k\rho NA.$$

Здесь Δ – высота профиля; NA – числовая апертура; V – волноводный параметр; $h(r)$ – функция, принимающая значения от 0 до 1 при изменении r от 0 до ρ .

С учетом (3) запишем уравнение (2) в виде:

$$\left\{\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \chi_1^2\right\} A_{str}(r) = -4\pi F_{str}(r), \quad (4)$$

$$\chi_1^2 \equiv k^2 n_{co}^2 - \beta^2, \quad F_{str}(r) \equiv -\frac{V^2}{4\pi\rho^2} h(r) A_{str}(r), \quad \text{где } 0 \leq r \leq \rho.$$

Рассмотрим однородное уравнение, соответствующее уравнению (4), и перейдем к полярным координатам, для основной моды получим:

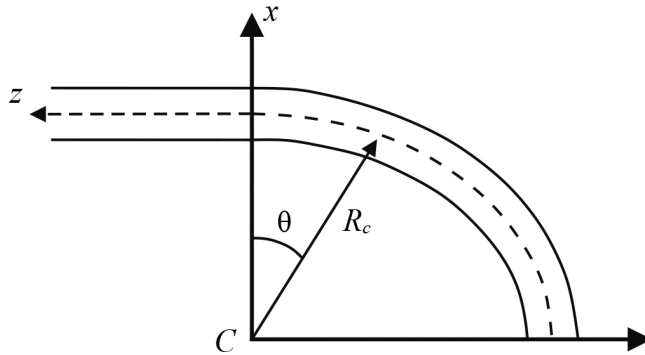
$$\begin{aligned} \left\{\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \chi_1^2\right\} A_{str(0)}(r) &\equiv 0, \\ \left\{d^2/dr^2 + (1/r)d/dr + \chi_1^2\right\} A_{str(0)} &= 0, \\ A_{str(0)}(r) &= J_0(\chi_1 r), \end{aligned}$$

где $J_0(\chi_1 r)$ – функция Бесселя нулевого порядка. Таким образом, общее решение уравнения (4) для прямого участка световода можно записать в виде:

$$A_{str(tot)}(r) = \text{const} \cdot \{J_0(\chi_1 r) + A_{str}(r)\}, \quad 0 \leq r \leq \rho, \quad (5)$$

где $A_{str}(r)$ – частное решение неоднородного уравнения (4).

В случае изогнутого участка световода пусть θ – угловая координата по изгибу, отчитываемая от оси x ; R_c – радиус кривизны с центром в точке C вне волновода, постоянный относительно оси изгиба; z – расстояние вдоль изогнутого участка (рис. 1). Пунктирная линия – ось волновода, ось y направлена перпендикулярно плоскости рисунка.



Р и с. 1. Схематическое изображение волоконного световода с профилем показателя преломления $n(r)$, изогнутого в виде дуги с постоянным радиусом R_c и угловой координатой по изгибу θ (пунктирная линия проходит по оси световода)

Fig. 1. Schematic representation of a fiber-optic light guide with a refractive index profile $n(r)$, bent in the form of an arc with a constant radius R_c and angular coordinate along the bend θ (the dotted line runs along the axis of the fiber-optic light guide)

Источник: составлено автором.

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

На изгибе поле должно иметь угловую зависимость вида $\exp(i\kappa\theta)$, где κ – пунктирная постоянная, подлежащая определению. Установим локальную постоянную распространения $\hat{\beta}$ соотношением:

$$\exp(i\kappa\theta) \equiv \exp(i\hat{\beta}z), \quad z|_{\theta=0} = 0. \quad (6)$$

Вводя полярные координаты в поперечном сечении, согласно рисунку 1 и учитывая соотношение (6), запишем:

$$z = (R_c + r \cos \varphi) \theta \rightarrow \kappa = \hat{\beta} (R_c + r \cos \varphi). \quad (7)$$

Поскольку на оси световода ($r = 0$) в начале изгиба должно быть $\hat{\beta} = \beta$, то для постоянной κ находим $\kappa = \beta R_c$ и из предыдущего соотношения получаем:

$$\begin{aligned} \beta R_c &= \hat{\beta} (R_c + r \cos \varphi), \\ \hat{\beta} &= \frac{\beta R_c}{(R_c + r \cos \varphi)} \approx (r \ll R_c) \approx \beta \left\{ 1 - \frac{r}{R_c} \cos \varphi \right\}. \end{aligned}$$

Для слабонаправляющего световода:

$$\hat{\beta}^2 \approx \beta^2 \left(1 - 2 \frac{r}{R_c} \cos \varphi \right) \approx \beta^2 - 2 \beta^2 \frac{r}{R_c} \cos \varphi \approx \beta^2 - 2 k^2 n_{co}^2 \frac{r}{R_c} \cos \varphi. \quad (8)$$

Таким образом, заменяя изогнутый участок на эквивалентный прямой с заменой β на локальную постоянную распространения $\hat{\beta}$, аналогично (1) запишем:

$$E_{curv}(t, x, y, z) = \exp(-i\omega t) \exp\left(i\hat{\beta}z\right) A_{curv}(r),$$

где $A_{curv}(r)$ – координатная часть электрического поля изогнутого участка световода. Для $A_{curv}(r)$ аналогично (4) и с учетом (9) получим:

$$\left\{\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \chi_1^2\right\} A_{curv}(r) = -4\pi Q_{curv}(r), \quad (9)$$

где $\chi_1^2 \equiv k^2 n_{co}^2 - \beta^2$, $Q_{curv}(r) \equiv F_{curv}(r) + f_{curv}(r)$, $F_{curv}(r) \equiv -\frac{V^2}{4\pi\rho^2} h(r) A_{curv}(r)$, $f_{curv}(r) \equiv \frac{k^2 n_{co}^2}{2\pi} \frac{r}{R_c} \cos\phi A_{curv}(r)$.

Аналогично (5) общее решение уравнения (9) для изогнутого участка световода можно записать в виде:

$$A_{curv(tot)}(r) = \text{const} \cdot \{J_0(\chi_1 r) + A_{cerv}(r)\}, \quad 0 \leq r \leq \rho, \quad (10)$$

где $A_{curv}(r)$ – частное решение неоднородного уравнения (9).

Результаты исследования. Частные решения неоднородных уравнений типа (4) и (7) проще искать методом Грина $G(x, y; x', y')$ [33]:

$$\begin{aligned} \left(\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \chi_1^2\right) X(x, y) &= -4\pi Z(x, y), \\ X(x, y) &= \iint dx' dy' G(x, y; x', y') Z(x', y'), \\ G(x, y; x', y') &= i\pi H_0^{(1)}(\chi_1 r_{12}), \\ r_{12} &= \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $H_0^{(1)}(x)$ – функция Ханкеля первого рода нулевого порядка от аргумента x . Переходя к полярным координатам и воспользовавшись частным случаем «теоремы сложения» для цилиндрических функций⁴:

$$H_0^{(1)}(\chi_1 r_{12}) = H_0^{(1)}(\chi_1 r) J_0(\chi_1 r') + 2 \sum_{k=1}^{\infty} H_k^{(1)}(\chi_1 r) J_k(\chi_1 r') \cos(k\phi'),$$

⁴ Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 1232 с.

с помощью формул для уравнений (4) и (9) соответственно, запишем решения в виде:

$$A_{str}(r) = -\frac{i\pi V^2}{2\rho^2} H_0^{(1)}(\chi_1 r) \int_0^{\rho} r' J_0(\chi_1 r') h(r') A_{str}(r') dr' \quad (12)$$

и

$$A_{curv}(r) = -\frac{i\pi V^2}{2\rho^2} H_0^{(1)}(\chi_1 r) \int_0^{\rho} dr' r' J_0(\chi_1 r') h(r') A_{curv}(r') + \\ + \frac{i\pi k^2 n_{co}^2}{R_c} H_1^{(1)}(\chi_1 r) \int_0^{\rho} dr' r'^2 J_1(\chi_1 r') A_{curv}(r'), \quad (13)$$

где $H_k^{(1)}(x)$ – функция Ханкеля первого рода k -го порядка; $J_k(x)$ – функция Бесселя k -го порядка.

Согласно выражениям (12–13) для (5) и (10) в первом приближении запишем для общих решений:

$$A_{str(tot)}(\gamma) \approx \text{const} \cdot \left\{ J_0(\chi_1 \rho \gamma) - \frac{i\pi V^2}{2} H_0^{(1)}(\chi_1 \rho \gamma) \Theta(\chi_1 \rho) \right\}, \\ \Theta(\chi_1 \rho) \equiv \int_0^1 \gamma J_0^2(\chi_1 \rho \gamma) h(\gamma) d\gamma, \quad \gamma \equiv \frac{r}{\rho} \quad (14)$$

и

$$A_{curv(tot)}(\gamma) \approx \left\{ (k\rho)^2 n_{co}^2 = \frac{V^2}{2\Delta} \right\} \approx \\ \approx \text{const} \cdot \left\{ J_0(\chi_1 \rho \gamma) - \frac{i\pi V^2}{2} H_0^{(1)}(\chi_1 \rho \gamma) \Theta(\chi_1 \rho) + \right. \\ \left. + i\pi \frac{V^2}{2\Delta} \frac{\rho}{R_c} H_1^{(1)}(\chi_1 \rho \gamma) \int_0^1 \gamma^2 J_0(\chi_1 \rho \gamma) J_1(\chi_1 \rho \gamma) d\gamma \right\}.$$

В уравнении (5) $A_{str(0)}(r) = J_0(\chi_1 r)$ и аналогичным с ним образом в выражении (10) $A_{curv(0)}(r) = A_{str(0)}(r) = J_0(\chi_1 r)$.

Согласно данным технического руководства, для оптоволокон $2\Delta \in (0,006; 0,060)$, поэтому для простоты расчетов из этого интервала выберем $2\Delta \approx 0,010 \rightarrow \Delta \approx 0,005$. Таким образом, формула принимает вид:

$$A_{curv(tot)}(\gamma) \approx \text{const} \cdot \left\{ J_0(\chi_1 \rho \gamma) - \frac{i\pi V^2}{2} H_0^{(1)}(\chi_1 \rho \gamma) \Theta(\chi_1 \rho) + \right. \\ \left. + i\pi 10^2 V^2 \frac{\rho}{R_c} H_1^{(1)}(\chi_1 \rho \gamma) \int_0^1 \gamma^2 J_0(\chi_1 \rho \gamma) J_1(\chi_1 \rho \gamma) d\gamma \right\}.$$

Поскольку функция Ханкеля первого рода порядка k имеет вид $H_k^{(1)}(z) = J_k(z) + iN_k(z)$, где $J_k(z)$, $N_k(z)$ – соответственно функция Бесселя и функция Неймана порядка k , перепишем выражения (12–13) в следующем виде для удобства дальнейших расчетов:

$$A_{str(tot)}(\gamma) = \text{const} \cdot \{a_1(\gamma) - ib_1(\gamma)\}, \\ a_1(\gamma) \equiv J_0(\chi_1 \rho \gamma) + \frac{\pi V^2}{2} N_0(\chi_1 \rho \gamma) \Theta(\chi_1 \rho), \\ b_1(\gamma) \equiv \frac{\pi V^2}{2} J_0(\chi_1 \rho \gamma) \Theta(\chi_1 \rho) \quad (15)$$

и

$$A_{curv}(\gamma) = \text{const} \cdot \{ (a_1(\gamma) - a_2(\gamma)) - i(b_1(\gamma) - b_2(\gamma)) \}, \\ a_2 \equiv 10^2 \pi V^2 \frac{\rho}{R_c} N_1(\chi_1 \rho \gamma) \Psi(\chi_1 \rho), \\ b_2(\gamma) = 10^2 \pi V^2 \frac{\rho}{R_c} J_1(\chi_1 \rho \gamma) \Psi(\chi_1 \rho), \Psi(\chi_1 \rho) \equiv \int_0^1 \gamma^2 J_0(\chi_1 \rho \gamma) J_1(\chi_1 \rho \gamma) d\gamma. \quad (16)$$

Учитывая выражения (15–16), определим величину q (отношение энергии W_{curv} изогнутого участка волокна к энергии W_{str} прямого участка волокна):

$$q \equiv \frac{\int_0^1 |A_{curv}(\gamma)|^2 \gamma d\gamma}{\int_0^1 |A_{str}(\gamma)|^2 \gamma d\gamma} = \\ = 1 - \frac{2 \int_0^1 a_1(\gamma) a_2(\gamma) \gamma d\gamma + 2 \int_0^1 b_1(\gamma) b_2(\gamma) \gamma d\gamma - \int_0^1 a_2^2(\gamma) \gamma d\gamma - \int_0^1 b_2^2(\gamma) \gamma d\gamma}{\int_0^1 a_1^2(\gamma) \gamma d\gamma + \int_0^1 b_1^2(\gamma) \gamma d\gamma}, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned}
 \int_0^1 a_2^2(\gamma) \gamma d\gamma &= 10^4 \pi^2 V^4 \left(\frac{\rho}{R_c} \right)^2 \Psi^2(\chi_1 \rho) I_1; \\
 \int_0^1 b_2^2(\gamma) \gamma d\gamma &= 10^4 \pi^2 V^4 \left(\frac{\rho}{R_c} \right)^2 \Psi^2(\chi_1 \rho) I_2; \\
 \int_0^1 a_1(\gamma) a_2(\gamma) \gamma d\gamma &= 10^2 \pi V^2 \frac{\rho}{R_c} \Psi(\chi_1 \rho) \left\{ I_3 + \frac{\pi V^2}{2} \Theta(\chi_1 \rho) I_4 \right\}; \\
 \int_0^1 b_1(\gamma) b_2(\gamma) \gamma d\gamma &= 10^2 \frac{\pi^2 V^4}{2} \frac{\rho}{R_c} \Theta(\chi_1 \rho) \Psi(\chi_1 \rho) I_5; \\
 \int_0^1 a_1^2(\gamma) \gamma d\gamma &= I_6 + \pi V^2 \Theta(\chi_1 \rho) I_7 + \frac{\pi^2 V^4}{4} \Theta^2(\chi_1 \rho) I_8; \\
 \int_0^1 b_1^2(\gamma) \gamma d\gamma &= \frac{\pi^2 V^4}{4} \Theta^2(\chi_1 \rho) I_6
 \end{aligned} \tag{18}$$

и

$$\begin{aligned}
 I_1 &\equiv \int_0^1 N_1^2(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma; & I_2 &\equiv \int_0^1 J_1^2(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma; \\
 I_3 &\equiv \int_0^1 J_0(\chi_1 \rho \gamma) N_1(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma; & I_4 &\equiv \int_0^1 N_0(\chi_1 \rho \gamma) N_1(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma; \\
 I_5 &\equiv \int_0^1 J_0(\chi_1 \rho \gamma) J_1(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma; & I_6 &\equiv \int_0^1 J_0^2(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma; \\
 I_7 &\equiv \int_0^1 J_0(\chi_1 \rho \gamma) N_0(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma; & I_8 &\equiv \int_0^1 N_0^2(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Используем известные формулы из теории цилиндрических функций⁵:

⁵ Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.
Instruments and methods of experimental physics

$$\int Z_p^2(ax) x dx = \frac{x^2}{2} \{ Z_p^2(ax) - Z_{p-1}(ax) Z_{p+1}(ax) \}, \quad Z_{-p}(x) = -(-1)^p Z_p(x),$$

$$\{ J_1(x), N_1(x) \} = -\{ J'_0(x), N'_0(x) \}, \quad Z_2(x) = Z_0(x) - 2Z'_1(x),$$

$$\left\{ N_0(x) \approx \frac{2}{\pi} J_0(x) \left[\ln \frac{x}{2} + C \right], \quad N'_0(x) \approx \frac{2}{\pi} J'_0(x) \left[\ln \frac{x}{2} + C \right] \right\} \Big|_{x \in (0,1)},$$

$$C = 0,5772156649015325... \rightarrow C' = C + \ln \frac{1}{2} \approx -0,116. \quad (20)$$

Здесь $Z_p(x)$ – любая цилиндрическая функция порядка p от аргумента x ; C – постоянная Эйлера, $f'(x) = df(x)/dx$; p – целое число.

Запишем также легко вычисляемые интегралы (рассматриваемые как интегралы от параметра δ ; $\Phi(x)$ – интеграл вероятностей ошибок):

$$\int_0^1 \exp(-a\gamma^2) \ln(\delta\gamma) d\gamma = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \Phi(\sqrt{a}) \ln \delta,$$

$$\int_0^1 \exp(-a\gamma^2) [\ln(\delta\gamma)]^2 d\gamma = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \Phi(\sqrt{a}) (\ln \delta)^2,$$

$$\int_0^1 \exp(-a\gamma^2) \gamma \ln(\delta\gamma) d\gamma = \frac{[1 - \exp(-a)]}{2a} \ln \delta,$$

$$\Phi(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt. \quad (21)$$

Как известно, в одномодовом режиме работы волновода со ступенчатым профилем вместо функции Бесселя $J_0(\chi_1 r)$ можно применять функцию Гаусса (r_0 – радиус модового пятна) [34].

$$J_0(\chi_1 \rho \gamma) \rightarrow \exp\left(-\frac{\alpha \gamma^2}{2}\right) \rightarrow J'_0(\chi_1 \rho \gamma) = \frac{1}{(\chi_1 \rho)} \frac{d}{d\gamma} \left\{ \exp\left(-\frac{\alpha \gamma^2}{2}\right) \right\},$$

$$\left[J_0^2(\chi_1 \rho \gamma) \right]' = \frac{1}{(\chi_1 \rho)} \frac{d}{d\gamma} \left\{ \exp(-\alpha \gamma^2) \right\},$$

$$\alpha \equiv \frac{\rho^2}{r_0^2} = 0,16V^2, \quad V \in (0; 2,4). \quad (22)$$

Распространяя формулу (22) на случай рассматриваемого градиентного профиля и комбинируя формулы (20–22), для интегралов (19) и для функций $\Theta(\chi_1 \rho)$ и $\Psi(\chi_1 \rho)$ из (14) и (16) получим:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{2}{\pi^2} \{ \ln(\chi_{1\rho}) - 0,116 \}^2 \left\{ \frac{\alpha(2-\alpha)}{(\chi_{1\rho})^2} - 1 \right\} \exp(-\alpha), \\
 I_2 &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\alpha(2-\alpha)}{(\chi_{1\rho})^2} - 1 \right\} \exp(-\alpha), \\
 I_3 &= \frac{1}{2\pi(\chi_{1\rho})} \left\{ \left[\ln(\chi_{1\rho}) - 0,116 \right] \left[\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \Phi(\sqrt{\alpha}) - 2 \exp(-\alpha) \right] + \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \Phi(\sqrt{\alpha}) \right\}, \\
 I_4 &= \frac{1}{\pi^2 (\chi_{1\rho})} \{ \ln(\chi_{1\rho}) - 0,116 \}^2 \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \Phi(\sqrt{\alpha}) - 2 \exp(-\alpha) \right\}, \\
 I_5 &= \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \Phi(\sqrt{\alpha}) - 2 \exp(-\alpha) \right\}, \\
 I_6 &= \frac{\{1 - \exp(-\alpha)\}}{2\alpha}, \\
 I_7 &= \frac{1}{\pi\alpha} \{1 - \exp(-\alpha)\} \{ \ln(\chi_{1\rho}) - 0,116 \}, \\
 I_8 &= \frac{2}{\pi^2} \{ \ln(\chi_{1\rho}) - 0,116 \}^2 \left\{ 1 + \frac{\alpha^2}{(\chi_{1\rho})^2} \right\} \exp(-\alpha), \\
 \Psi(\chi_{1\rho}) &= \frac{\{1 - (1 + \alpha) \exp(-\alpha)\}}{\alpha(\chi_{1\rho})}, \\
 \Theta(\chi_{1\rho}) \rightarrow \Theta(\alpha) &= \int_0^1 \exp(-\alpha\gamma^2) \gamma h(\gamma) d\gamma.
 \end{aligned}$$

Так как использовали формулы (22) для упрощения вычислений в рассматриваемом одномодовом режиме, то считаем, что при двух описаниях поток энергии через поперечное сечение одинаков:

$$\int_0^1 J_0^2(\chi_{1\rho} \gamma) \gamma d\gamma \equiv \int_0^1 \exp(-\alpha \gamma^2) \gamma d\gamma = \frac{1}{2\alpha} \{1 - \exp(-\alpha)\}.$$

С другой стороны, для левой части этого соотношения, согласно (15) и (18):

$$\int_0^1 J_0^2(\chi_1 \rho \gamma) \gamma d\gamma = \frac{1}{2} \left\{ J_0^2(\chi_1 \rho \gamma) + \frac{1}{(\chi_1 \rho)^2} \left[\frac{d}{d\gamma} J_0(\chi_1 \rho \gamma) \right]^2 \right\}_{\gamma=1} =$$

$$= \left\{ J_0(\chi \rho \rightarrow \exp(-\alpha/2)) \right\} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\alpha^2}{(\chi_1 \rho)^2} \right\} \exp(-\alpha).$$

Сравнивая правые части, находим (подробней в работе [15]):

$$(\chi_1 \rho) = (\chi_1 \rho)(V) = \left\{ \frac{\alpha^3}{\exp \alpha - 1 - \alpha} \right\}^{1/2}.$$

Используя формулы (14), (17–18), для (13) получаем $W_{str-curv} = W_{str} - W_{curv}$:

$$q(\alpha, \beta) \equiv \frac{\int_0^1 |A_{curv}(\gamma)|^2 \gamma d\gamma}{\int_0^1 |A_{str}(\gamma)|^2 \gamma d\gamma} = 1 - \frac{W_{str-curv}}{W_{str}},$$

$$W_{str} \equiv \frac{[1 - \exp(-\alpha)]}{2\alpha} \left[1 + 2V^2 \Theta(\alpha) w_3 + \frac{\pi^2 V^4}{4} \Theta^2(\alpha) \right] + \frac{V^4}{2} \Theta^2(\alpha) \exp(-\alpha) w_3^2 w_5,$$

$$W_{str-curv} \equiv 10^2 V^2 \beta w_1 \left\{ \pi^2 V^2 w_4 \Theta(\alpha) - \left[\frac{\exp(\alpha) - 1 - \alpha}{\alpha^3} \right]^{1/2} w_3 \times \right.$$

$$\left. \times \left[w_3 w_4 (1 + w_3 V^2 \Theta(\alpha)) + \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \Phi(\sqrt{\alpha}) \right] - 10^2 V^2 \beta w_1 w_2 \exp(-\alpha) \left(2w_3^2 - \frac{\pi^2}{2} \right) \right\}, \quad (23)$$

где

$$w_1(\alpha) \equiv \left[\frac{\exp(\alpha) - 1 - \alpha}{\alpha} \right]^{1/2} \frac{[1 - (1 + \alpha) \exp(-\alpha)]}{\alpha^2},$$

$$w_2(\alpha) \equiv \frac{(2 - \alpha) [\exp(\alpha) - 1 - \alpha]}{\alpha^2} - 1,$$

$$w_3(\alpha) \equiv \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\alpha^3}{\exp(\alpha) - 1 - \alpha} \right] - 0,116,$$

$$w_4(\alpha) \equiv \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \Phi(\sqrt{\alpha}) - 2 \exp(-\alpha),$$

$$w_5(\alpha) \equiv 1 + \frac{[\exp(\alpha) - 1 - \alpha]}{\alpha},$$

$$\Theta(\alpha) = \int_0^1 \exp(-\alpha\gamma^2) \gamma h(\gamma) d\gamma,$$

$$\Phi(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt,$$

$$\alpha = 0,16V^2, \quad \beta \equiv \rho/R_c \ll 1, \quad V \in (0; 2,4). \quad (24)$$

Таким образом, полученные формулы (23–24) описывают изменение энергии в волокне при малых изгибах для произвольного градиентного профиля в первом приближении.

Чтобы представить результат наглядно, необходимо знание конкретного профиля, описываемого функцией $h(\gamma)$, входящей в величину $\Theta(\alpha)$. Поскольку квадратичный профиль наиболее приближен к реально используемым градиентным профилям, то в качестве примера численные расчеты произведем именно для такого профиля, соответствующего функции $h(\gamma) = \gamma^2$ (формулы (3), (10)). В этом случае для $\Theta(\alpha)$ из (20) получаем:

$$\Theta(\alpha) \Rightarrow (h(\gamma) = \gamma^2) \Rightarrow \int_0^1 \exp(-\alpha\gamma^2) \gamma^3 d\gamma = \frac{\{1 - (1 + \alpha)\exp(-\alpha)\}}{2\alpha}. \quad (25)$$

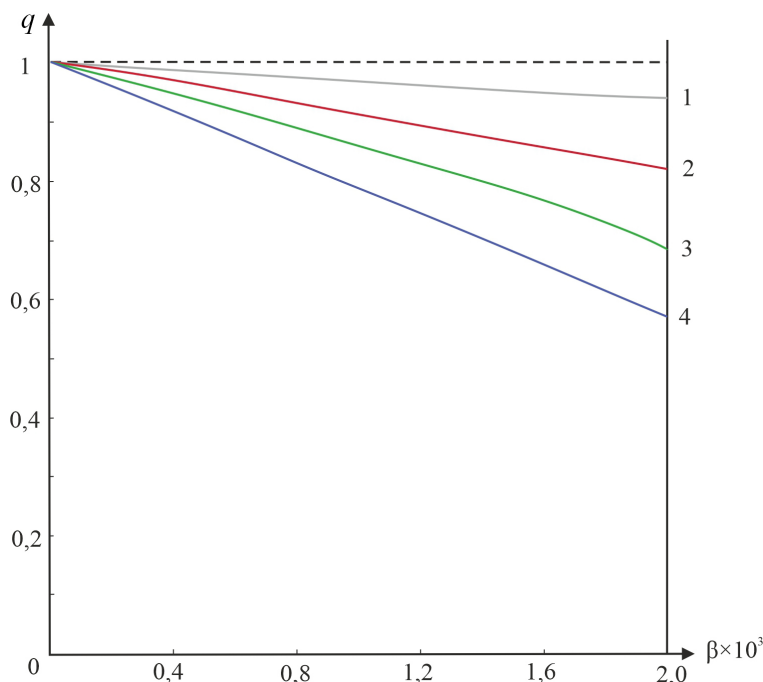
Остался вопрос с выбором значений параметра $\beta = \rho/R_c$. Исходим из того, что для оптоволоконного кабеля, согласно техническому руководству, существует общепринятое соотношение $R_{c(\min)} \approx 20 \times D_{cable}$ между диаметром кабеля D_{cable} и минимальным радиусом кривизны $R_{c(\min)}$. С другой стороны, для одномодовых волокон, также согласно техническому руководству, существует соотношение $d/D_{cable} \approx (8 \div 10)/125$ между D_{cable} и диаметром волокна $d = 2\rho$. Из этих соотношений находим:

$$R_c > R_{c(\min)} \Rightarrow \beta = \frac{\rho}{R_c} < \frac{\rho}{R_{c(\min)}} \approx \frac{(8 \div 10)}{5000} = (1,16 \div 2) \cdot 10^{-3}. \quad (26)$$

На этом основании выберем для β значения:

$$\beta \in (0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2) \cdot 10^{-3}. \quad (27)$$

С использованием формул (23–27) проведены вычисления. Они приводят к зависимости относительной энергии q от параметра $\beta = \rho/R_c$ для различных значений волноводного параметра V при высоте профиля $\Delta \approx 0,005$ (рис. 2).



Р и с. 2. Зависимость отношения q от параметра β для различных значений волноводного параметра V : (кривая 1 – $V_1 = 0,5$; кривая 2 – $V_2 = 0,9$; кривая 3 – $V_3 = 1,3$; кривая 4 – $V_4 = 1,7$)

F i g. 2. Dependence of the ratio q on the parameter β for different values of the waveguide parameter V : (curve 1 – $V_1 = 0.5$; curve 2 – $V_2 = 0.9$; curve 3 – $V_3 = 1.3$; curve 4 – $V_4 = 1.7$)

Источник: составлено автором.

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

На рисунке 2 показана зависимость отношения q от параметра β для различных значений волноводного параметра V : (кривая 1 – $V_1 = 0,5$; кривая 2 – $V_2 = 0,9$; кривая 3 – $V_3 = 1,3$; кривая 4 – $V_4 = 1,7$).

Обсуждение и заключение. В первом приближении для квадратичного профиля построены зависимости относительной энергии q от параметра β при различных значениях волноводного параметра V . Энергия q убывает с увеличением β при этом тем быстрее, чем больше V . Предложенный метод исследования влияния микроизгибов на передаваемую энергию – замена изогнутого участка на эквивалентный прямолинейный – позволяет в конечном итоге анализировать энергетические потери в зависимости от радиуса изгиба не только для рассмотренного квадратичного, но и для любого градиентного профиля в первом приближении методом функции Грина, что может быть использовано как при конструировании волноводов с заранее заданными свойствами, так и в различных технических приложениях (волоконно-оптические датчики в технике и медицине, проблема безопасности передачи данных и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gambling W. A., Matsumura H., Ragdale C. M. Curvature and Microbending Losses in Single-Mode Optical Fibres // *Optical and Quantum Electronics*. 1979. Vol. 11. P. 43–59. <https://doi.org/10.1007/BF00624057>
2. Потери в одномодовых волоконных световодах на однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления / В. А. Аксенов [и др.] // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49, № 6. С. 734–742. EDN: OWHJWF
3. Wang Q., Farrell G., Freir T. Theoretical and Experimental Investigations of Macro-Bend Losses for Standard Single Mode Fibers // *Optics Express*. 2005. Vol. 13, Issue 12. P. 4476–4484. URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-13-12-4476&id=84325> (дата обращения: 17.11.2023).
4. Wen-Ming C., Shyh-Lin T. Performance Enhancement on Mechanical and Electrical Effects for On-line Fiber-Optic Bending Loss Measurement // *Optik*. 2005. Vol. 116, Issue 5, P. 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.jpleo.2005.01.013>
5. New Optical Fiber Micro-Bend Pressure Sensors Based on Fiber-Loop Ringdown / Z. Wang [et al.] // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 29. P. 4234–4238. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.649>
6. Mode Coupling and Field Distribution in Sub-mm Permanently Bent Single Mode Optical Fibers / A. Iadicco [et al.] // *Optics & Laser Technology*. 2013. Vol. 47. P. 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.08.012>
7. Optical Fibers with Gradient Index Nanostructured Core / R. Buczyński [et al.] // *Optics Express*. 2015. Vol. 23, Issue 20, P. 25588–25596. <https://doi.org/10.1364/OE.23.025588>
8. Manipulating Microbending Losses in Single Mode Optical Fiber for Pressure Sensing / W. M. Mukhtar [et al.] // *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2017. Vol. 9, Issue 1. P. 14–21. URL: https://www.akademibaru.com/doc/ARASETV9_N1_P14_21.pdf (дата обращения: 15.11.2023).
9. Tong Y., Chen S., Tian H. A Bend-Resistant Low Bending Loss and Large Mode Area Two-Layer Core Single-Mode Fiber with Gradient Refractive Index Ring and Multi-Trench // *Optical Fiber Technology*. 2018. Vol. 45. P. 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.07.010>
10. Гладких В. А. Расчет мощности поля, проникающего во внешнюю оболочку слабонаправляющего одномодового волоконного световода // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 4. С. 557–561. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-557-561>
11. Two-Dimensional Displacement Optical Fiber Sensor Based on Macro-Bending Effect / A. Ghaffar [et al.] // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 120. Article no. 105688. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105688>
12. Мосунова И. Д., Селезнёв Д. А., Ременникова М. В. Исследование спектрального пропускания оптического волокна при малых изгибах // *Прикладная фотоника*. 2019. Т. 6, № 1–2. С. 17–23. EDN: KYIJVJ
13. An Investigation in the Influence of Helical Structure on Bend Loss of Pavement Optical Fiber Sensor / L. Meng [et al.] // *Optik*. 2019. Vol. 183. P. 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.jpleo.2019.02.102>
14. Улучшение технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей / Е. А. Полякова [и др.] // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2020. № 1 (33). С. 126–135. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2020-1-10>
15. Gladkikh V. A., Vlasenko V. D. Investigation of the Dependence of the Field Energy in a Low Conductive Fiber Optic with a Gradient Profile of the Refractive Index // *Optik*. 2021. Vol. 245. Article no. 167735. <https://doi.org/10.1016/j.jpleo.2021.167735>
16. Design, Sensing Principle and Testing of a Novel Fiber Optic Displacement Sensor Based on Linear Macro-Bending Loss / Y. Zheng [et al.] // *Optik*. 2021. Vol. 242. Article no. 167194. <https://doi.org/10.1016/j.jpleo.2021.167194>
17. Хисамов Д. В., Смирнова А. Н., Азанова И. С. Влияние радиуса изгиба на долговечность оптических волокон типа «Панда» // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2021. № 4. С. 52–57. URL: <https://clck.ru/3CFDWe> (дата обращения: 17.11.2023).

18. Evaluating and Minimizing Induced Microbending Losses in Optical Fiber Sensors Embedded Into Glass-Fiber Composites / P. Zhu [et al.] // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39, Issue 22. P. 7315–7325. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3112484>
19. Расчет параметров макроразгибного отвода оптического излучения из волоконных световодов / И. В. Денисов [и др.] // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 2. С. 18–26. URL: <https://radiotec.ru/ru/journal/Radioengineering/number/2021-2/article/19457> (дата обращения: 15.11.2023).
20. Дышлюк А. В., Ерюшева У. А., Витрик О. Б. Расщепление резонансных линий изогнутого волоконно-оптического резонатора Фабри-Перо // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 1. С. 38–44. URL: <https://computeroptics.ru/KO/PDF/KO45-1/450105.pdf> (дата обращения: 17.11.2023).
21. Влияние геометрии оптического волокна на выходное лазерное излучение / Р. Р. Кашина [и др.] // Фотоника. 2021. Т. 15, № 2. С. 144–150. URL: <https://www.photonics.su/journal/article/8768> (дата обращения: 17.11.2023).
22. Гладких В. А., Власенко В. Д. Исследование поля и энергии в слабопроводящем оптоволокне со степенным профилем показателя преломления произвольной степени // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 588–599. EDN: LARQQM
23. Micro-Bending Sensing Based on Single-Mode Fiber Spliced Multimode Fiber Bragg Grating Structure / X. Sun [et al.] // Optics Communications. 2022. Vol. 505. Article no. 127513. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127513>
24. A Liquid Level Sensor Based on Spiral Macro-Bending Plastic Optical Fiber / K. Liao [et al.] // Optical Fiber Technology. 2022. Vol. 70. Article no. 102874 <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102874>
25. Investigation of a Spring-Shaped Fiber Modulation Based on Bending Loss for Detecting Linear Displacement / Y. Zheng [et al.] // Measurement. 2022. Vol. 194. Article no. 10976. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110976>
26. Иванов Д. А. Волоконно-оптические WDM-мультиплексоры/демультиплексоры с малыми изгибными потерями // Russian Technological Journal. 2022. Т. 10, № 2. С. 7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>
27. Иванов С. А., Закалкин П. В., Смирнов И. Ю. Моделирование оптического волокна на основе фазоконтурных схем замещения // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 5. С. 500–508. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=radel&y=2022&v=67&n=5&a=RadEl2205007Ivanov> (дата обращения: 17.11.2023).
28. Large-Mode-Area Multi-Resonant All-Solid Photonic Bandgap Fiber with Low Bending Loss and Robust Single-Mode Operation / X. Chen [et al.] // Optics & Laser Technology. 2023. Vol. 157. Article no. 108668. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108668>
29. Funnell A. C., Thomas P. J. Design of a Flexible Weight Sensor Using Optical Fibre Macrobending // Sensors. 2023. Vol. 23, Issue 2. Article no. 912. <https://doi.org/10.3390/s23020912>
30. Денисов И. В., Лисовский Н. В. Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10, № 1. С. 131–148. URL: https://applied.photonics.pstu.ru/_res/fs/4561file.pdf (дата обращения: 14.11.2023).
31. Fusion Splicing of Hollow-Core to Standard Single-Mode Fibers Using a Gradient-Index Bridge Fiber / Z. Zhang [et al.] // Journal of Optical Technology. 2023. Vol. 90, Issue 1. P. 76–83. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-01-76-83>
32. Жгуты оптических волокон с высоким показателем преломления для проведения ТГц визуализации с субволновым разрешением (обзор) / Д. Г. Меликянц [и др.] // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131, Вып. 6. С. 762–781. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/55910> (дата обращения: 17.11.2023).
33. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 218–233. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
34. Трешиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM-системы // Фотон-экспресс. 2012. № 7. С. 34–37. EDN: PIBPEO

REFERENCES

1. Gambling W.A., Matsumura H., Ragdale C.M. Curvature and Microbending Losses in Single-Mode Optical Fibres. *Optical and Quantum Electronics*. 1979;11:43–59. <https://doi.org/10.1007/BF00624057>
2. Aksenov V.A., Voloshin V.V., Vorobyev I.L., Ivanov G.A., Isaev V.A., Kolosovskii A.O., et al. [Losses in Single-Mode Optical Fibers Occurring in Isolated Bends of Small Radius: Rectangular Profile of Refractive Index]. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2004;49(6):734–742. (In Russ.) EDN: OWHJWF
3. Wang Q., Farrell G., Freir T. Theoretical and Experimental Investigations of Macro-Bend Losses for Standard Single Mode Fibers. *Optics Express*. 2005;13(12):4476–4484. Available at: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-13-12-4476&id=84325> (accessed 17.11.2023).
4. Wen-Ming C., Shyh-Lin T. Performance Enhancement on Mechanical and Electrical Effects for On-line Fiber-Optic Bending Loss Measurement. *Optik*. 2005;116(5):201–210. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2005.01.013>
5. Wang Z., Jiang M., Xu H., Du R. New Optical Fiber Micro-Bend Pressure Sensors Based on Fiber-Loop Ringdown. *Procedia Engineering*. 2012;29:4234–4238. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.649>
6. Iadicco A., Paladino D., Moccia M., Quero G., Campopiano S., Bock W.J., et al. Mode Coupling and Field Distribution in Sub-mm Permanently Bent Single Mode Optical Fibers. *Optics & Laser Technology*. 2013;47:292–304. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.08.012>
7. Buczyński R., Klimczak M., Stefaniuk T., Kasztelan R., Siwicki B., Stępniewski G., et al. Optical Fibers with Gradient Index Nanostructured Core. *Optics Express*. 2015; 23(20):25588–25596. <https://doi.org/10.1364/OE.23.025588>
8. Mukhtar W.M., Marzuki N.A., Rashid A.R. Manipulating Microbending Losses in Single Mode Optical Fiber for Pressure Sensing. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2017;9(1):14–21. Available at: https://www.akademiarbaru.com/doc/ARASETV9_N1_P14_21.pdf (accessed 15.11.2023).
9. Tong Y., Chen S., Tian H. A Bend-Resistant Low Bending Loss and Large Mode Area Two-Layer Core Single-Mode Fiber with Gradient Refractive Index Ring and Multi-Trench. *Optical Fiber Technology*. 2018;45:235–243. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.07.010>
10. Gladkikh V.A. Calculation of the Power of the Field, Penetrating into the External Environment of the Weakening Guide of a Single-Mode Fiber. *Computer Optics*. 2019;43(4):557–561. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-557-561>
11. Ghaffar A., Hou Y.-L., Liu W.-Y., Dharejo F.A., Zhang H.-X., Jia P., et al. Two-Dimensional Displacement Optical Fiber Sensor Based on Macro-Bending Effect. *Optics & Laser Technology*. 2019;120:105688. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105688>
12. Mosunova I.D., Seleznev D.A., Remennikova M.V. Research of the Spectral Transmittance of Optical Fibers at Small Bends. *Applied Photonics*. 2019;6(1–2):17–23. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: KYIJVJ
13. Meng L., Wang L., Xiong H., Wang H., Guo X. An Investigation in the Influence of Helical Structure on Bend Loss of Pavement Optical Fiber Sensor. *Optik*. 2019;183:189–199. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.102>
14. Polyakova E.A., Badeeva E.A., Murashkina T.I., Badeeva A.V., Slavkin I.E. Influence of Optical Fiber Bends on Metrological and Operational Characteristics of Fiber-Optic Measuring Transducers. *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*. 2020;1(33):126–135. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2020-1-10>
15. Gladkikh V.A., Vlasenko V.D. Investigation of the Dependence of the Field Energy in a Low Conductive Fiber Optic with a Gradient Profile of the Refractive Index. *Optik*. 2021;245:167735. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167735>
16. Zheng Y., Yu J., Zhu Z.-W., Zeng B., Yang C. Design, Sensing Principle and Testing of a Novel Fiber Optic Displacement Sensor Based on Linear Macro-Bending Loss. *Optik*. 2021;242:167194. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167194>

17. Khisamov D.V., Smirnova A.N., Azanova I.S. Influence of the Bend Radius for PANDA PM Specialty Optical Fibers Reliability. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2021;(4):52–57. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3CFDWe> (accessed 17.11.2023).
18. Zhu P., Liu P., Wang Z., Peng C., Zhang N., Soto M.A. Evaluating and Minimizing Induced Microbending Losses in Optical Fiber Sensors Embedded Into Glass-Fiber Composites. *Journal of Lightwave Technology*. 2021;39(2):7315–7325. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3112484>
19. Denisov I.V., Sedov V.A., Sedova N.A., Lisovskiy N.V., Kiper A.V. [Calculation of the Parameters of Macro-bending Optical Output From Optical Fibers]. *Radio Engineering*. 2021;85(2):18–26. (In Russ.) Available at: <https://radiotec.ru/ru/journal/Radioengineering/number/2021-2/article/19457> (accessed 15.11.2023).
20. Dyshlyuk A.V., Eryusheva U.A., Vitirk O.B. Splitting of Resonances in a Curved Optical Fiber-Based Fabry-Perot Resonator. *Computer Optics*. 2021;45(1):38–44. (In Russ, abstract in Eng.) Available at: <https://computeroptics.ru/KO/PDF/KO45-1/450105.pdf> (accessed 17.11.2023).
21. Kashina R.R., Konin Yu.A., Velikotsky Yu.A., Rakhmatullina A.R., Petukhova A.Yu., Shcherbakova V.A., et al. Dependence of the Output Laser Radiation on Geometry of the Optical Fiber. *Photonics*. 2021;15(2):144–150. Available at: https://www.photonics.su/files/article_pdf/8/article_8768_161.pdf (accessed 17.11.2023).
22. Gladikh V.A., Vlasenko V.D. Investigation of Field and Energy in a Weakly-Conducting Optical Fiber with an Arbitrary Degree of Refractive Index Profile. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):588–599. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: LARQQM
23. Sun X., Zhang L., Zeng L., Hu Y., Duan J. Micro-Bending Sensing Based on Single-Mode Fiber Spliced Multimode Fiber Bragg Grating Structure. *Optics Communications*. 2022;505:127513. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127513>
24. Liao K., Li Y., Lei M., Li X. A Liquid Level Sensor Based on Spiral Macro-Bending Plastic Optical Fiber. *Optical Fiber Technology*. 2022;70:102874 <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102874>
25. Zheng Y., Zeng B., Yu J., Yang C., Li Z. Investigation of a Spring-Shaped Fiber Modulation Based on Bending Loss for Detecting Linear Displacement. *Measurement*. 2022;194:10976. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110976>
26. Ivanov D.A. Fiber Optical WDM Multiplexers/Demultiplexers with Low Bending Losses. *Russian Technological Journal*. 2022;10(2):7–13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>
27. Ivanov S.A., Zakalkin P.V., Smirnov I.Yu. [Optical Fiber Modeling Based on Phase-Loop Substitution Schemes]. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2022;67(5):500–508. (In Russ.) Available at: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=radel&y=2022&v=67&n=5&a=RadEl2205007Ivanov> (accessed 17.11.2023).
28. Chen X., Huang L., Yang H., Xi X., An Y. Yan Z., et al. Large-Mode-Area Multi-Resonant All-Solid Photonic Bandgap Fiber with Low Bending Loss and Robust Single-Mode Operation. *Optics & Laser Technology*. 2023;157:108668. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108668>
29. Funnell A.C., Thomas P.J. Design of a Flexible Weight Sensor Using Optical Fibre Macro-bending. *Sensors*. 2023;23(2):912. <https://doi.org/10.3390/s23020912>
30. Denisov I.V., Lisovsky N.V. The Systematization of Bending-Sensitive Fiber Light Guides. *Applied Photonics*. 2023;10(1):131–148. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://applied.photonics.pstu.ru/_res/fs/4561file.pdf (accessed 14.11.2023).
31. Zhang Z., Li R., Wang C., Zhou M., Liu Y., Pang Y. Fusion Splicing of Hollow-Core to Standard Single-Mode Fibers Using a Gradient-Index Bridge Fiber. *Journal of Optical Technology*. 2023;90(1):76–83. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-01-76-83>
32. Melikyants D.G., Kurlov V.N., Zaytsev K.I., Katyba G.M. [Bundles of Optical Fibers with a High Refractive Index for Conducting thz Visualization with Subwavelength Resolution]. *Optics and Spectroscopy*. 2023;131(6):762–781. (In Russ.) Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/55910> (accessed 17.11.2023).
33. Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., Konevtsov L.A., Martynova E.G., Hasan I.H. Modeling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(2):218–233. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>



34. Treshchikov V.N., Listvin V.N. [DWDM-Systems]. *Photon Express*. 2012;(7):30–32. (In Russ.) EDN: PIBPEO

Об авторах:

Гладких Вячеслав Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН (680000, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3922-9609>, Researcher ID: [GLU-2712-2022](https://orcid.org/0000-0002-3922-9609), gladkih@as.khb.ru

Власенко Виктор Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН (680000, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-4532>, Researcher ID: [E-2432-2019](https://orcid.org/0000-0001-7782-4532), vlasenko@as.khb.ru

Заявленный вклад авторов:

В. А. Гладких – разработка концепции и плана статьи, проведение теоретических исследований, обзор и анализ литературы, формулировка выводов.

В. Д. Власенко – расчеты, анализ результатов, подготовка текста с последующей доработкой.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 07.12.2023; поступила после рецензирования 09.02.2024;
принята к публикации 16.02.2024*

About the authors:

Vyacheslav A. Gladkikh, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (65 Kim Yu Chen St., Khabarovsk 680000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3922-9609>, Researcher ID: [GLU-2712-2022](https://orcid.org/0000-0002-3922-9609), gladkih@as.khb.ru

Victor D. Vlasenko, Cand.Sc. (Phys.-Math.), Scientific Secretary, Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (65 Kim Yu Chen St., Khabarovsk 680000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-4532>, Researcher ID: [E-2432-2019](https://orcid.org/0000-0001-7782-4532), vlasenko@as.khb.ru

Authors contribution:

V. A. Gladkikh – development of the concept and plan of the article, theoretical research, review and analysis of literature, formulation of conclusions.

V. D. Vlasenko – calculations, analysis of the results, preparation of the text with subsequent revision.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 07.12.2023; revised 09.02.2024; accepted 16.02.2024

Информация для авторов и читателей

Научный журнал «Инженерные технологии и системы» публикует оригинальные научные исследования, способствующие развитию науки в области инженерных систем и технологий.

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

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки)

1.3.6. Оптика (технические науки)

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

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

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

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

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. **В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).** Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью систем «Антиплагиат» и «iThenticate».

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях. Особое внимание следует уделить качеству перевода. Желательно, чтобы он был выполнен носителем английского языка.

При подготовке статьи к публикации в журнале «Инженерные технологии и системы» необходимо учесть следующие пункты:

1. Указать **УДК**.

2. **Заголовок статьи** должен кратко и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного исследования. *Приводится на русском и английском языках.*

3. **Аннотация** (200–250 слов) выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

1) Введение (Introduction);

2) Цель статьи (Aim of the Article);

3) Материалы и методы (Materials and Methods);

4) Результаты исследования (Results);

5) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion).

Приводится на русском и английском языках.

4. **Ключевые слова** (5–10) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. *Приводятся на русском и английском языках.*

5. **Благодарности.** В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

6. **Основной текст** статьи излагается на русском или английском языках.

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Необходимо описать основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделить нерешенные вопросы в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого – при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

7. **Список литературы** (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 30–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 20, иностранных – не менее 15. Следует указать DOI или адрес доступа в сети Интернет. *Оформляется на русском и английском языках.*

8. **Об авторах.** Ф.И.О., организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), должность и ученое звание, ORCID, Researcher ID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. *Приводится на русском и английском языках.*

9. **Заявленный вклад авторов.** В конец рукописи необходимо включить примечания, в которых разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. *Приводится на русском и английском языках.*

10. Техническое оформление.

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx, .rtf. Желательно использовать шрифт Times New Roman, кегль 14 и интервал 1,5 строки. Расстановка переносов вручную не допускается. Запрещается использовать двойные пробелы в тексте, а также выполнять отступы (красная строка), используя пробелы.

2) Формулы набираются сочетанием основного шрифта и шрифта Symbol (исключение для дробей, сумм, квадратного корня) в Microsoft Equation 3.0 (Редактор формул в Microsoft Word) или Math Type 6. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении.

3) Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

4) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Они должны допускать редактирование текста и возможность изменения размеров. Все графические данные помещаются в текст статьи, а также высылаются дополнительно в виде отдельных файлов. Разнохарактерные иллюстрации необходимо приводить к единому стилю графического исполнения, соблюдая единообразие их оформления. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

При подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями прилагаемого лицензионного договора.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале «Инженерные технологии и системы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

«Инженерные технологии и системы» – журнал открытого доступа, то есть все содержание находится в свободном доступе бесплатно для пользователя в соответствии с определением BOAI открытого доступа. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Журнал распространяется по подписке, заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц. Подписной индекс – 70539.

Сенин Петр Васильевич – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 23-32-60.

Левцев Алексей Павлович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-41-01.

Чаткин Михаил Николаевич – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 25-44-20.

Гордина Екатерина Павловна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.

Information for authors and readers of the journal

Engineering Technologies and Systems journal accepts unpublished earlier original research results promoting the development of science in the field of engineering systems and technologies.

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

Instruments and Methods of Experimental Physics

Optics

Electrophysics, Electrophysical Installations

Friction and Wear in Machines

Gardening, Olericulture, Viticulture and Medicinal Plants

Technologies, Machinery and Equipment for Agroindustrial Complex

Electrotechnologies, Electrical Equipment and Power Supply of Agroindustrial Complex

It is not allowed to submit papers that have already been published or sent for publication to other journals. **In the case of multiple submission of a manuscript, the published article will be retracted.** Monitoring of unauthorized citation is implemented by means of Antiplagiat and iThenticate systems.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing materials about significant achievements in the specified areas of science. Special attention should be paid to the quality of the translation. Preferably it should be made by a native English speaker.

To submit an article in the journal *Engineering Technologies and Systems* you should know:

1. It is necessary to indicate the **Universal Decimal Classification** (UDC) code.

2. **The title of the article** should accurately reflect the content of the article, the subject matter and the results of the research conducted.

The title should be written in Russian and English.

3. **The abstract** (200–250 words) serves as an enhanced title of the article and briefly presents its content. The abstract consists of the following components:

1) Introduction;

2) Aim of the Article;

3) Materials and Methods;

4) Results;

5) Discussion and Conclusion.

The abstract should be written in Russian and English.

4. **Keywords** (5–10) make the search profile of the scientific article. In this regard, they should reflect the main provisions, achievements, results and terminology of the scientific research.

Keywords should be written in Russian and English.

5. **Acknowledgements.** In this section the author may mention the people who helped them to prepare the article or the organizations that provided financial support. It is considered good style to express gratitude to anonymous reviewers.

Acknowledgements should be written in Russian and English.

6. **The main body** of the article should be written in Russian or in English.

1) **Introduction.** It contains formulation of the scientific problem, its relevance, connection with the most important tasks to be solved, the importance for the development of a particular area of science or practical activities.

2) **Literature Review.** It is necessary to describe the main (recent) pieces of research and publications relied upon by the author, modern views on the problem, difficulties in solving the problem as well as to highlight the unresolved issues within the general problem of the article.

3) **Materials and Methods.** This section describes the process of designing the experiment, the methods and equipment used; it gives detailed information about the subject and sequence of the research, justifies the choice of the methods used (observation, survey, testing, experiment, etc.).

4) **Results.** This is the main section, the purpose of which is to prove the working hypothesis (hypotheses) by analyzing, generalizing and explaining the data. The results should be brief, but they should provide sufficient information to evaluate the conclusions drawn. It should also be justified why the particular data were chosen for the analysis.

5) Discussion and Conclusion. In conclusion, the results of understanding the topic should be summarized; conclusions, generalizations and recommendations arising from the work should be made, their practical significance should be emphasized and the main directions for further research in the studied area should be determined.

7. **References** should be given in accordance with the requirements of the *GOST R 7.0.5–2008* standard. The original sources from scientific journals included in the global citation indices should be cited first of all. It is desirable to refer to 30–40 sources. Of these, at least 20 sources should be those published over the past 3 years and at least 15 foreign ones. DOI or the URL of the source should be indicated.

References should be written in Russian and English.

8. Information **about the author(s)** includes: the author's first name and last name, the name of the institution and its address (it is required to specify all the institutions where the author works and where the research was conducted (permanent place of work, the place where the project was done, etc.)). The author's position and academic title, ORCID, Researcher ID, e-mail, phone number, postal address for sending a personal copy of the journal issue.

Information about the authors should be written in Russian and English.

9. **Authors contribution.** At the end of the manuscript, the authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the work performed.

Contribution of the authors should be written in Russian and English.

10. **Manuscript Format Guidelines.**

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program for Windows (.doc, .docx, .rtf): sheet size – A4, Times New Roman font, font size – 14, line spacing – 1.5. Manual hyphenation is not allowed. It is forbidden to use double spaces in the text, as well as to indent (red line) using spaces.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or Math Type 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) typed in italics. Formulas are numbered in parentheses. Only those formulas and equations referenced in the following presentation should be numbered.

3) All titles, signatures and structural elements of graphs, tables, charts, etc., are to be provided in Russian and English.

4) Figures can be presented in raster or vector format with a resolution of at least 300 dpi. They should allow text editing and resizing. All graphic data are placed in the text of the article, as well as sent additionally as separate files. Diverse illustrations should be brought to a single style of graphic performance, while respecting the uniformity of their design. Graphs, charts and diagrams must be drawn up in Microsoft Excel.

When submitting an article to the journal, the author agrees with the provisions of the attached license agreement.

As part of the submission, the journal will peer review your article before deciding whether to publish it. *Engineering Technologies and Systems* journal uses double-blind review, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa. On the basis of the analysis of the article, the reviewer makes a decision whether to recommend the article for publication or reject it. If the author disagrees with the reviewer's comments, their reasoned statement shall be considered by the Editorial Board.

Editorial staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism, ethical principles, kept in community of leading scientific issues publishers. Journal's editorial policy is based upon traditional ethical principles of Russian academic periodicals; it supports Academic Periodicals Ethical Codex, stated by Committee on Publication Ethics (Russia, Moscow) and it is formed in account of standards of ethics of editors' and publishers' work confirmed by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by Committee on Publication Ethics (COPE).

Engineering Technologies and Systems is an open access journal, which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles, or use them for any other lawful purpose, without asking prior permission from the publisher or the author in accordance with the BOAI definition of open access. All the materials of the journal are made available under a Creative Commons "Attribution" 4.0 license.

The journal is distributed on the basis of a subscription, requests of higher education institutions, educational institutions and individuals. The subscription index is 70539.

Petr V. Senin – Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 233260.

Alexey P. Levtshev – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254101.

Mikhail N. Chatkin – Deputy Editor-in-Chief. Tel.: +7 (8342) 254420.

Ekaterina P. Gordina – Executive Editor. Tel.: +7 (8342) 481424.

Редакторы – *М. А. Сульдина, С. Х. Зинина*
Перевод *Н. Н. Плеханковой*
Компьютерная верстка *Е. А. Климкиной*
Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Подписано в печать 13.09.2024 г. Дата выхода в свет 30.09.2024 г.

Формат $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 14,63.

Тираж 1 000 экз. 1 завод – 150 экз. Заказ № 518. Свободная цена.

Адрес типографии: 430005, Российская Федерация, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24
(Издательство федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»)



Editors *M. A. Suldina, S. H. Zinina*
Translation *N. N. Plekhankova*
Desktop publishing *E. A. Klimkina*
Informational support *R. V. Karasev*

Distributed in Russian Federation and foreign countries.

Signed to print 13.09.2024. Date of publishing 30.09.2024.

Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$. Conventional printed sheets 14.63.

Number of copies 1 000. Factory 1 – 150 copies. Order no. 518. Free price.

Address of Printing House: 24 Sovetskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation
(Publishing House of National Reserch Mordovia State University)